SZKOŁA DOKTORSKA POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Analiza plastycznego kształtowania wyrobów śrubowych o specjalnym przeznaczeniu matrycami segmentowymi

Doktorant:
mgr inż. Katarzyna Balawender, Szkoła Doktorska na Politechnice Rzeszowskiej
Promotor:
dr hab. inż. Tadeusz Balawender prof. PRz

Składam serdeczne podziękowania

Panu dr hab. inż. Tadeuszowi Balawender, prof. PRz

za nieocenioną pomoc oraz wszelkie uwagi i wskazówki,

udzielone podczas realizacji niniejszej pracy.

Katarzyna Balawender

Spis treści

I Aktualny stan technologii śrubowych elementów złącznych 5
1. Proces produkcyjny elementów złącznych 7
1.1. Przygotowanie materiału 7
1.2. Kucie śrub i walcowanie gwintów 10
1.2.1. Kucie 11
1.2.2. Walcowanie gwintów 17
1.3. Narzędzia do kucia śrub na kuźniarkach 18
1.4. Zużycie narzędzi 22
1.5. Wady powstające w procesie kucia 29
1.6. Obróbka cieplna 41
1.7. Powłoki ochronne 44
1.8. Selekcja 100% 46
2. Elementy złączne wymagające zastosowania matryc segmentowych podczas kucia na kuźniarkach 48
2.1. Śruby dla budownictwa 48
2.2. Śruby dla motoryzacji 51
3. Krytyczna analiza technologii kształtowania wyrobów śrubowych o złożonej geometrii 54
3.1. Technologie wytwarzania elementów śrubowych 54
3.2. Matryce segmentowe w procesach kucia wyrobów śrubowych 54
3.3. Wytwarzanie śrub o złożonej geometrii 55
3.4. Identyfikacja luki badawczej i uzasadnienie podjęcia badań 56
4. Określenie celu i zakresu badań 58
5. Plan badań 60
II Część eksperymentalna 61
6. Metodyka i wyniki badań 61
6.1. Charakterystyka funkcjonalna śruby łącznika stabilizatora 64
6.2. Analiza możliwości kształtowania plastycznego śruby łącznika stabilizatora na kuźniarce 66
6.3. Wstępne próby technologiczne 68
6.4. Analiza numeryczna procesu plastycznego kształtowania śruby łącznika stabilizatora na kuźniarce 73
6.4.1. Charakterystyka modelu numerycznego 74
6.4.2. Model geometryczny 74
6.4.3. Warunki brzegowe i model materiałowy 75
7. Produkcja prototypów 83

8. Próby technologiczne kucia z zastosowaniem matryc segmentowych 85
8.1. Próby technologiczne kucia z zastosowaniem matryc segmentowych na operacji IV – wariant I 85
8.2. Próby technologiczne kucia z zastosowaniem matryc segmentowych na operacji IV przy zmianie kształtu spęczek – wariant II 91
8.3. Próby technologiczne kucia z zastosowaniem matryc segmentowych na operacji IV przy zmianie kształtu spęczek z zastosowaniem dodatkowego walcowania krytycznego promienia łba 102
8.4. Zużycie narzędzia podtrzymującego wstępnie uformowany łeb śruby 107
8.5. Inne aspekty technologiczne stanowiące wyzwania pracy badawczej 109
8.5.1. Trudności wytwórcze dotyczące materiału śruby 110
8.5.2. Trudności wytwórcze dotyczące funkcjonalności śruby łącznika stabilizatora 126
9. Opracowanie kompletnego procesu wytwórczego wraz z procesem kontrolnym 132
9.1. Proces wytwórczy 132
9.2. Proces kontrolny 134
10. Podsumowanie i wnioski 137
Literatura 140
Spis rysunków 144
Spis tabel 150
Streszczenie 151
Abstract 152

I Aktualny stan technologii śrubowych elementów złącznych

Jednym z najbardziej wymagających ‘konsumentów’ wyrobów śrubowych jest przemysł motoryzacyjny. W pełni zautomatyzowane linie montażowe do produkcji pojazdów stawiają nowe wymagania dla producentów elementów złącznych; są to, m.in.: obniżenie kosztów, redukcja wagi, downsizing kształtów (mniejszy kształt, wyższa wytrzymałość), nietypowa geometria, wyższe prędkości dokręcania, zapewnienie właściwego montażu złącza śrubowego, zapewnienie bezpieczeństwa funkcjonalnego w eksploatacji pojazdów. Ciągły rozwój branży motoryzacyjnej wymusza doskonalenie technologii produkcji elementów złącznych stosowanych w samochodach. Dotyczy to w szczególności dwóch obszarów. Po pierwsze, aspektu ciągłego wzrostu jakości pracy złącza z uwzględnieniem bezpieczeństwa jego funkcjonowania, na co bezpośrednio wywiera wpływ jakość samego elementu złącznego. Po drugie, aspektu racjonalizacji kosztów produkcji. Geometria śrub stosowanych w wielu gałęziach przemysłu, zwłaszcza przemysłu motoryzacyjnego, staje się coraz bardziej skomplikowana. Produkcja śrub o łbach sześciokątnych wykazuje znaczący trend spadkowy w ciągu ostatnich lat. Wzrasta natomiast zapotrzebowanie na łączniki o nietypowych kształtach łbów. Zapotrzebowanie to wymusza ciągłe doskonalenie technologii produkcji oraz stosowanie dodatkowych procesów obróbki, jak np. „uszlachetnianie” kształtów wyrobów za pomocą procesów obróbki skrawaniem bądź opracowanie procesu produkcyjnego tylko poprzez obróbkę skrawaniem. Procesy uszlachetniania wyrobów śrubowych są często wykorzystywane do produkcji prototypów. Dla produkcji na skalę masową procesy obróbki skrawaniem muszą być tak opracowane by koszt narzędzi skrawających i wydajność procesu były adekwatne do ilości produkcyjnej i ceny finalnej wyrobu. Połączenie tych czynników staje się niezwykle trudne zwłaszcza przy produkcji elementów złącznych o nietypowej geometrii łba. W takim przypadku produkcja śruby poprzez proces obróbki skrawaniem przeważnie jest niewydajna i nieopłacalna. Dlatego istnieje potrzeba ciągłego rozwoju procesów przeróbki plastycznej, dzięki którym wyroby o nietypowych kształtach można produkować z większą wydajnością i niższym kosztem produkcji w porównaniu do wytwarzania ich z zastosowaniem metod obróbki skrawaniem. Proces plastycznego kształtowania wyrobu śrubowego stanowi złożony układ oddziaływań pomiędzy materiałem, narzędziami oraz parametrami technologicznymi. Istotną rolę odgrywa materiał wsadowy oraz narzędzia.

Nawet przy prawidłowo dobranych parametrach procesu, brak materiału o odpowiednich właściwościach mechanicznych oraz narzędzi o odpowiednich wymiarach i charakterystyce pracy, uniemożliwia uzyskanie wyrobu końcowego spełniającego wysokie wymagania zarówno przemysłu motoryzacyjnego, jak i budowlanego. W konsekwencji rozwój procesów przeróbki plastycznej powinien koncentrować się na systematycznym doskonaleniu narzędzi, przy czym szczególny nacisk należy kłaść na rozwiązania wykorzystujące matryce dzielone, w tym ruchome matryce dzielone, a nie wyłącznie lite. Rozwiązania te są szczególnie zasadne w przypadku wytwarzania elementów o nietypowej geometrii, takich jak śruby o złożonych kształtach.

1. Proces produkcyjny elementów złącznych

Proces kucia na zimno jest jednym z najbardziej zaawansowanych i niezawodnych metod w produkcji elementów złącznych. Kucie na zimno to proces formowania metalu wysokim ciśnieniem bez użycia ciepła. W przeciwieństwie do kucia na gorąco, gdzie metal jest podgrzewany w celu zwiększenia ciągliwości, w kuciu na zimno stosuje się materiały o temperaturze pokojowej, wykorzystując siłę oddziaływania maszyny (prasy, kuźniarki) i precyzyjne matryce do nadania pożądanego kształtu.

Proces kucia na zimno wyrobów śrubowych zazwyczaj obejmuje następujące etapy:

1- Przygotowanie materiału wsadowego (walcówki)
- Trawienie walcówki
- Żarzenie walcówki
- Ponowne trawienie walcówki
- Nakładanie warstwy fosforanu na walcówkę
- Ciągnienie walcówki

2- Kucie na zimno

3- Walcowanie gwintów

1.1. Przygotowanie materiału

Walcówka stalowa walcowana na gorąco, w zakładach hutniczych, o przekroju kołowym, dostarczana w postaci kręgów (zwojów) formowanych bezpośrednio po procesie walcowania, pokryta jest warstwą zgorzeliny (tlenków żelaza), która utrudnia dalszą obróbkę. Dlatego pierwszym etapem przygotowania materiału do procesu kucia jest trawienie walcówki. Trawienie odbywa się w kwasie. Podczas trawienia walcówka przechodzi kolejno przez wanny np. z kwasem solnym, gdzie w każdej z nich maleje stężenie kwasu natomiast wzrasta stężenie żelaza, na skutek przechodzenia warstwy tlenków z powierzchni walcówki do kąpieli. Zawartość żelaza w kąpieli jest ściśle nadzorowana. Po osiągnięciu granicznej zawartości żelaza, kwas solny musi zostać wymieniony na nowy. Wcześniejsze etapy kontroli umożliwiają bieżący nadzór nad procesem dzięki czemu kąpiel uzupełniana jest odpowiednimi odczynnikami chemicznymi, zanim nastąpi konieczność całkowitej wymiany roztworu kwasu.

Dla produkcji elementów złącznych o skomplikowanej geometrii, wymagających dużych odkształceń w procesie kucia, walcówka po procesie usuwania zgorzeliny musi

zostać wyżarzona. W trakcie procesu walcowania walcówki, dochodzi do jej umocnienia na skutek odkształcenia plastycznego. Proces wyżarzania pozwala na redukcję właściwości mechanicznych, wzrost właściwości plastycznych, proces ten może również prowadzić do zdrowienia, usunięcia naprężeń własnych, rekrystalizacji oraz homogenizacji struktury powstałej w wyniku walcowania walcówki. Żarzenie sferoidyzujące walcówki prowadzone jest w piecu typu dzwonowego (np. rys. 1.1.1), wyposażonym w podstawę oraz cztery stojaki wsadowe, których łączna pojemność wynosi 18 ton materiału w jednym cyklu obróbki. Podczas procesu żarzenia walcówki duże znaczenie ma zapewnienie bezpiecznych i stabilnych warunków atmosferycznych w piecu. Atmosfera gazowa stosowana w procesach cieplnych ma zasadnicze znaczenie dla ochrony powierzchni materiału przed niekorzystnymi reakcjami chemicznymi. Przy właściwej kontroli składu gazowego oraz wilgotności atmosfery procesowej nie dochodzi do istotnych zmian zawartości węgla w materiale, takich jak nawęglanie czy odwęglanie. Po osiągnięciu przez piec zadanej temperatury następuje etap wygrzewania materiału w określonych warunkach temperaturowych przez ustalony czas, a końcową fazę procesu stanowi kontrolowane chłodzenie wsadu; np. dla śrub specjalnych, wykonywanych wg rysunku klienta, wytwarzanych w firmie Koelner Rawlplug IP z materiału 23MnB4, temperatura wygrzewania wynosi 730^0C przez okres 4,5 godz., następnie palniki są wyłączane, materiał jest schładzany do temperatury 680^0C i przebywa w tej temperaturze przez 4 godz. Po tym etapie następuje zmiana kołpaka grzewczego na kołpak chłodzący i materiał wytrzymywany jest pod kołpakiem chłodzącym przez okres 6 godz. Celem wyżarzania sferoidyzującego jest uzyskanie struktury złożonej z ziaren ferrytu oraz sferoidalnych wydzieleń cementytu.



Rys. 1.1.1. Od lewej: walcówka w postaci zwojów kręgów umiejscowiona na bazie pieca przed rozpoczęciem procesu żarzenia; nakładanie kołpaka grzewczego na kołpak ochronny, pod którym umiejscowione są kręgi walcówki [1]

Po procesie trawienia i żarzenia, następuje proces płukania i aktywacji powierzchni walcówki. Etap ten ma za zadanie przygotować powierzchnię walcówki do nałożenia cienkiej warstwy fosforanu cynku. Prawidłowo przeprowadzony proces aktywacji, umożliwia powstanie wielu miejsc zarodkowania kryształów, dzięki czemu uzyskuje się drobnoziarnistą strukturę fosforanu cynku. Warstwa ta pełni rolę warstwy podsmarnej w późniejszym etapie ciągnienia oraz kucia na zimno. Mimo, iż warstwa fosforanu cynku jest nakładana celowo jako reduktor tarcia w procesach przeróbki plastycznej, jest ona niepożądana w procesach obróbki cieplnej. Tym samym musi zostać usunięta przed rozpoczęciem procesu hartowania śrub. Powierzchnia walcówki po procesie fosforanowania powinna być ciągła, jednolita, bez żadnych zanieczyszczeń i uszkodzeń (Rys. 1.1.2.).



Rys. 1.1.2. Zdjęcia obrazujące prawidłowy wygląd powłoki fosforanu nałożonej na walcówkę [1]

Ostatnim etapem przygotowania materiału do kucia na zimno jest redukcja średnicy walcówki do zadanej średnicy drutu, proces ten realizowany jest za pomocą ciągnienia. Jest to kolejny proces przeróbki plastycznej stali, w którym walcówka przechodzi przez szereg matryc ciągarskich, które stopniowo redukują jej średnicę. Tak przygotowany drut transportowany jest na wydział kucia, gdzie przy pomocy maszyn kuźniczych realizowany jest proces kucia na zimno.

1.2. Kucie śrub i walcowanie gwintów

W przypadku procesu produkcyjnego śrub oraz innych elementów złącznych, w pierwszym etapie realizowane jest kucie łbów i sworzni, następnie walcowanie gwintów. Wśród procesów przeróbki plastycznej wykorzystywanych w kuciu wyróżnia się [2]:

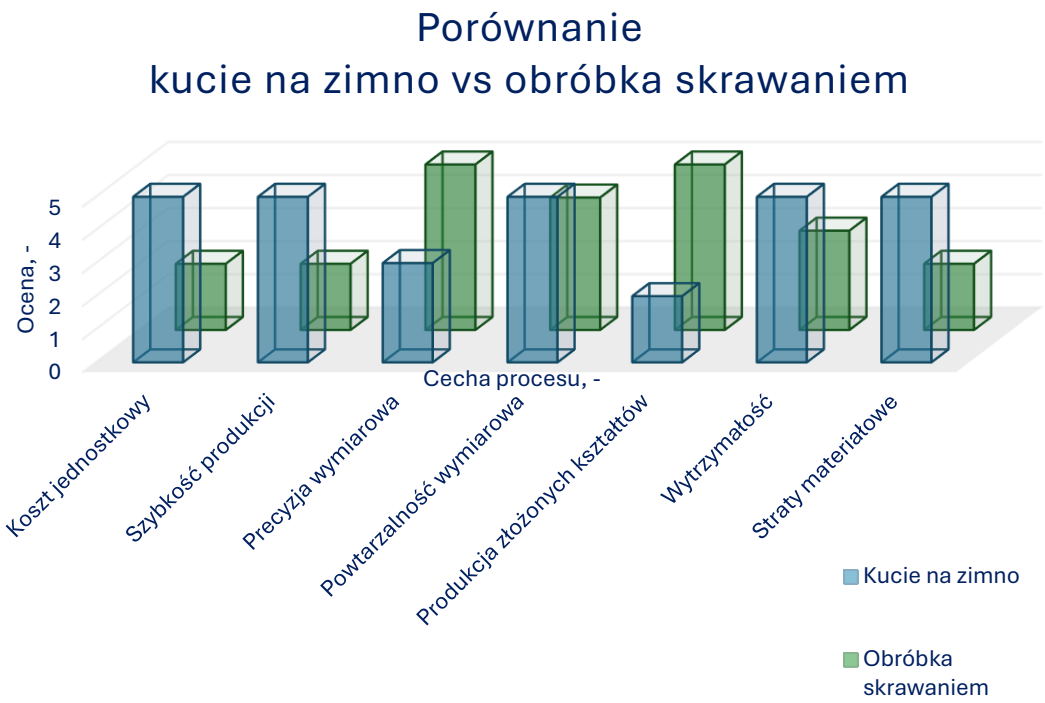
- kucie swobodne, w którym metal odkształca się między równoległymi kowadłami – płaskimi lub kształtowymi, które częściowo ograniczają jego swobodne płynięcie w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu narzędzia roboczego;
- kucie matrycowe, w którym metal odkształca się między matrycami (otwartymi lub zamkniętymi) o wykrojach odpowiadających kształtowanej odkuwce, jednakże całkowicie ograniczających jego płynięcie poprzeczne, które ma dodatkowo zapewnić ich pełne i prawidłowe wypełnienie;
- wyciskanie, w którym kształtowanie polega na wypływie metalu poddanego ściskaniu w zamkniętej przestrzeni komory roboczej, będącego pod działaniem stempla roboczego przez oczko matrycy o kształcie ściśle odpowiadającym przekrojowi poprzecznemu wyrobu. ze względu na kierunek płynięcia metalu względem ruchu stempla rozróżnia się wyciskanie współbieżne (ruch stempla zgodny z płynięciem metalu) lub wyciskanie przeciwbieżne (ruch przeciwny).

1.2.1. Kucie

Proces kucia na zimno odznacza się wieloma zaletami, które uzyskuje się na wyrobie finalnym. Do zalet tych należą [3]:

1- Wysoka efektywność wykorzystania materiału – W przypadku technologii kucia na zimno, która kształtuje materiały poprzez ich odkształcenie plastyczne, obowiązuje zasada stałej objętości, dzięki której objętość materiału wejściowego równa się objętości wyrobu gotowego (bez strat materiału). Pozwala to na redukcję kosztów materiałów. Wyjątek stanowią technologie z usuwaniem naddatku materiału.
2- Produkcja z dużymi prędkościami – Technologia kucia na zimno umożliwia produkcję z dużą prędkością około 100 sztuk na minutę, lub wyższą, w zależności od stopnia trudności wykonania detalu oraz możliwości technicznych maszyny.
3- Poprawione właściwości mechaniczne – Proces kucia umożliwia produkcję części o podwyższonej wytrzymałości oraz odporności na zużycie, wynika to z zmian zachodzących w materiale na skutek odkształcenia plastycznego oraz z zachowania ciągłości i prawidłowego przebiegu linii przepływu włókien w objętości odkuwki.
4- Skuteczne obniżenie kosztu wyrobu gotowego – Proces ten charakteryzuje się wysoką efektywnością wykorzystania materiału oraz krótkimi czasami cyklu, co w warunkach produkcji wielkoseryjnej prowadzi do istotnego obniżenia kosztów wytwarzania części.

Zalety te w stosunku do procesu obróbki mechanicznej prezentuje rys. 1.2.1.1.



Rys. 1.2.1.1. Porównanie zalet kucia na zimno w stosunku do obróbki mechanicznej w skali od 1 do 5 - opracowanie własne na podstawie danych zawartych w [4]

Główną zaletą kucia w porównaniu do obróbki skrawaniem jest wysoka wytrzymałość i spójność struktury. W procesie kucia linie płynięcia materiału są spójne z kształtem odkuwki co przekłada się na wyższą wytrzymałość na rozciąganie i odporność na zmęczenie. Jest to szczególnie ważne w przypadku elementów złącznych stosowanych w częściach nośnych, takich jak układy zawieszenia, silniki i zespoły kół. Struktura ziaren uzyskana w procesie kucia na zimno zwiększa odporność elementu na obciążenia cykliczne. Dzięki temu elementy złączne kute na zimno idealnie sprawdzają się w dynamicznych środowiskach, takich jak mocowania silnika, zespoły przekładni i części obrotowe. Kucie na zimno pozwala na uzyskanie zadanych tolerancji wymiarowych z dokładnością do części setnych, co zmniejsza potrzebę dodatkowej obróbki skrawaniem. Ten wysoki poziom precyzji jest niezbędny w zespołach samochodowych, gdzie nawet najmniejsza niewspółosiowość może prowadzić do wibracji, zużycia lub wycieków [4]. Nowoczesne, wielooperacyjne maszyny do kucia na zimno, umożliwiają produkcję skomplikowanych części z zachowaniem precyzji w milionach sztuk. Proces kucia na zimno zapewnia również gładszą powierzchnię w porównaniu z obróbką skrawaniem. Zmniejsza to potrzebę polerowania lub wtórnej obróbki powierzchni, a także poprawia odporność na korozję. Dobre wykończenie powierzchni jest istotne w przypadku

elementów złącznych, ponieważ wspomaga procesy galwanizacji i powlekania, które są niezbędne w przypadku elementów narażonych na pracę w wymagających warunkach środowiska np. środowiskach miejskich, przemysłowych bądź nawet agresywnych środowiskach o wysokim stopniu zasolenia czy wilgoci. W procesie kucia na zimno materiał jest kształtowany plastycznie bez usuwania materiału dzięki czemu straty materiałowe są minimalne. Koszt materiału wejściowego stanowi największy udział w całym koszcie procesu produkcyjnego elementów złącznych, zatem brak odpadu materiału powoduje, że kucie na zimno jest bardziej ekonomiczne niż obróbka skrawaniem, szczególnie w przypadku produkcji wielkoseryjnej. Wyjątek stanowi technologia kucia śrub okrawanych, gdzie występuje ubytek materiału na skutek procesu okrawania np. łba śruby. Ponadto kucie na zimno jest realizowane z większą prędkością niż obróbka skrawaniem. Przekłada się to na obniżenie kosztów produkcji, co jest szczególnie ważne w kontekście masowej produkcji dla branży motoryzacyjnej.

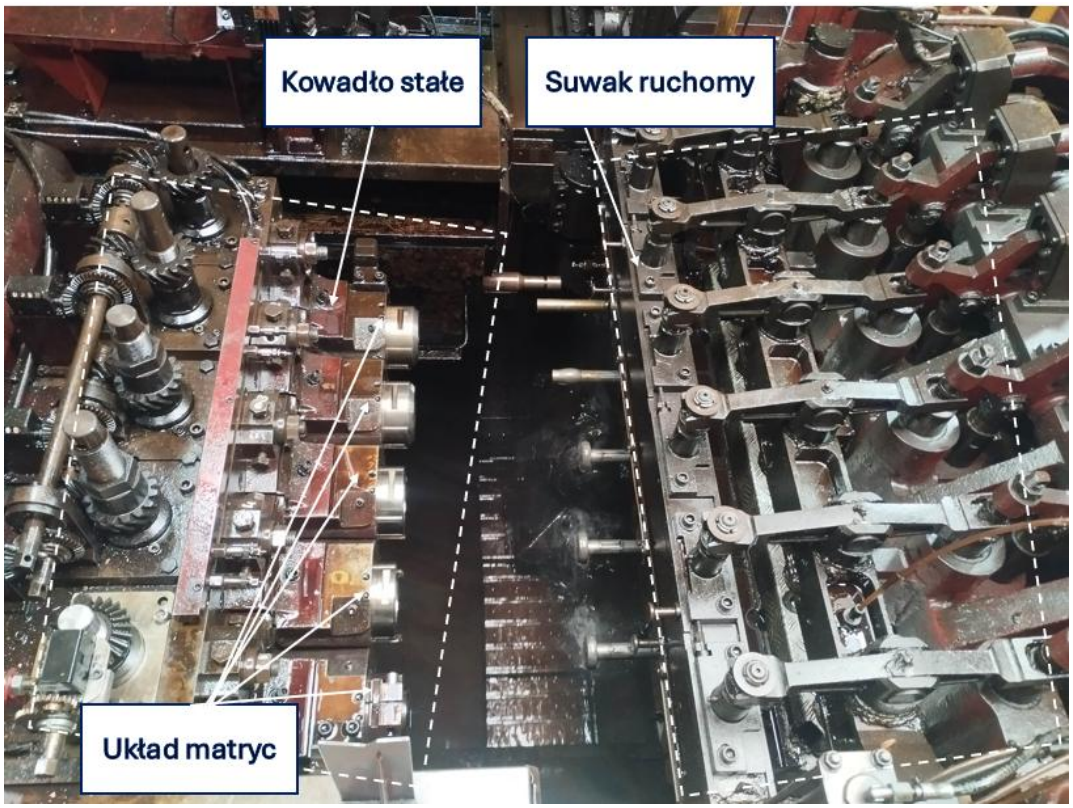
Pomimo wielu zalet, proces kucia na zimno wiąże się także z określonymi ograniczeniami, do których należą m.in. [3]:

1- Wysokie koszty pierwszego uruchomienia ze względu na konieczność przygotowania zestawu narzędziowego (matryce). Matryce muszą być wykonane z materiałów twardszych niż przedmiot obrabiany, aby wytrzymać wysokie naciski, co zwiększa koszty uruchomienia.
2- Realizacja pierwszej partii wymaga wykonania prac przygotowawczych związanych z uruchomieniem procesu, które wiążą się z dodatkowymi nakładami czasowymi i kosztowymi, co ogranicza opłacalność produkcji wyrobów w niewielkich seriach.
3- Do projektowania procesów i matryc wymagana jest wiedza specjalistyczna, co przekłada się na wysokie koszty zatrudnienia wykwalifikowanego personelu.
4- Ograniczenia technologiczne dotyczące formowania wybranych cech geometrycznych wykończenia, zwłaszcza promieni w strefach narożnych.

W technologii kucia na zimno materiał w postaci drutu jest podawany do maszyny, gdzie zostaje pocięty na odcinki o wymaganej długości, a następnie formowany w kolejnych stacjach roboczych (rys. 1.2.1.2.). Na każdym etapie (tj. przy kolejnym uderzeniu kuźniarki) materiał podlega spęczaniu lub przewężaniu. Spęczanie polega na zwiększeniu średnicy wsadu wskutek działania siły przekazywanej przez narzędzie formujące. Przewężanie (przepychanie) natomiast prowadzi do zmniejszenia średnicy

poprzez przetłaczanie materiału przez otwór w matrycy lub — alternatywnie — do formowania otworu w detalu za pomocą nagłownika, wzdłuż którego płynie materiał. W obu operacjach objętość materiału pozostaje stała — zmianie ulega wyłącznie geometria (wymiary) obrabianego elementu. Operacje takie jak okrawanie, przebijanie czy czubkowanie (skrawanie fazy na końcu trzpienia śruby), oprócz kształtu zmieniają również ilość materiału [5].

Większość maszyn stosowanych w obróbce plastycznej wyrobów śrubowych stanowią prasy poziome – kuźniarki (w przeciwieństwie do młotów, kuźniarki działają poziomo, co ułatwia automatyzację procesu). Kuźniarki posiadają stacjonarny i ruchomy blok matrycowy, w których montowane są narzędzia. Proces pozwala na wykonanie kilku operacji (spęczanie, przebijanie, wykrawanie) w jednym cyklu maszynowym. Niezależnie od rozwiązania konstrukcyjnego, ostateczny kształt wyrobu uzyskiwany jest przez współpracę narzędzi roboczych: spęczaków i nagłowników umieszczonych na ruchomym suwaku jednej strony kuźniarki oraz matryc umieszczonych w kowadle z drugiej strony kuźniarki (rys. 1.2.1.2.). W ujęciu ogólnym spęczaki i nagłowniki pełnią funkcję narzędzi uderzeniowych, które deformują element unieruchomiony w matrycy. Wielkość odkształcenia możliwa do uzyskania w jednym uderzeniu (na jednej stacji w maszynie wielomatrycowej) zależy od właściwości mechanicznych materiału oraz złożoności geometrycznej kształtowanego detalu [5]. W konsekwencji, w przypadku materiałów trudno odkształcalnych lub elementów o skomplikowanej geometrii konieczne jest wieloetapowe kształtowanie (nawet do ośmiu uderzeń/stacji) oraz stosowanie wsadu o większych średnicach. Z tego względu podstawowymi parametrami opisującymi maszyny do kucia na zimno są: liczba stacji roboczych, maksymalna średnica podawanego drutu, maksymalna siła kucia oraz dopuszczalna długość wytwarzanego elementu [5].



Rys. 1.2.1.2. Układ stacji roboczych w kuźniarce poziomej

Nowoczesne prasy do kucia na zimno mogą wykonywać kilka operacji w jednym cyklu, co sprawia, że proces jest niezwykle wydajny i powtarzalny — idealny do zastosowań w motoryzacji, gdzie powtarzalność ma kluczowe znaczenie. Podczas procesu formowania przedmiot obrabiany ulega złożonym odkształceniom, co często prowadzi do wad kucia w przypadku zastosowania niewłaściwych warunków obróbki. Wady występujące w wyrobach śrubowych opisane zostały w kolejnym podrozdziale.

Nowe kształty śrubowych elementów złącznych i innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne mają na celu poprawę niezawodności montażu poprzez zapewnienie wymaganej siły zacisku. Ułatwia to mechanizację i automatyzację procesów montażowych oraz obniża złożoność zarówno samego montażu, jak i konserwacji urządzeń. Obecnie fabryki produkujące elementy złączne oferują również opracowywanie i testowanie nowych konstrukcji elementów złącznych i połączeń zgodnie z wymaganiami klienta.

Dodatkowo autorzy wielu publikacji wskazują na wykorzystanie zaawansowanych symulacji numerycznych wspierających projektowanie procesów kucia. Przykładowo badania Chih-Cheng Yang i Chi-Husan [6] oraz A Ra Jo i współautorów [7] opierają się na rozbudowanych analizach komputerowych. W praktyce przemysłowej takie zasoby wymagają jednak specjalistycznego oprogramowania oraz dedykowanych zespołów

badawczo-rozwojowych, które są rzadko spotykane w przedsiębiorstwach produkujących elementy złączne.

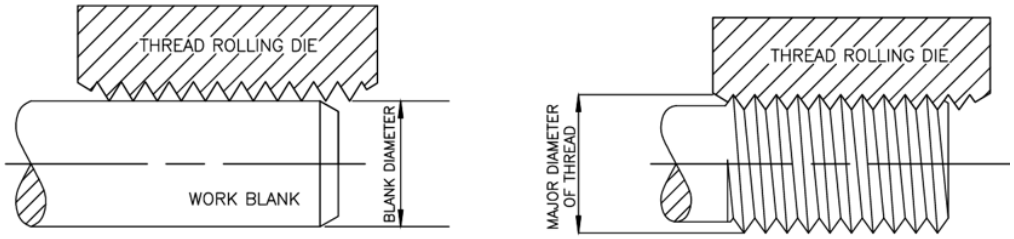
Rozwój specjalistycznych maszyn kuźniczych do kucia na zimno w drugiej połowie XX wieku umożliwił upowszechnienie technologii wytwarzania śrub tą metodą. Niemniej jednak nadal istnieje szereg trudności technologicznych podczas tego procesu produkcyjnego. Nawet najszerzej rozpowszechnione kształty łbów wyrobów śrubowych takie jak śruby z łbem sześciokątnym i kołnierzem stwarzają problemy technologiczne wymagające wdrażania nowych technologii kuźniczych [8].

Śruby z łbem sześciokątnym i kołnierzem, są produkowane przy użyciu różnych operacji technologicznych, tj. spęczania, wykrawania łba i kołnierza, czy redukcji łba sześciokątnego i dalszego spęczania kołnierza [8], [9]. Wykrawanie łba i kołnierza na kuźniarce czterooperacyjnej zapewnia uzyskanie dobrej jakości sześciokątnego łba śruby, ale produkuje przy tym duży odpad materiału oraz ze względu na wysokie obciążenia narzędzie do obróbki krawędzi ma niską wytrzymałość. Produkcja śruby kołnierzowej przy zastosowaniu jednooperacyjnej – dwutaktowej kuźniarki charakteryzuje się niską stabilnością procesu, ze względu na wysokie ryzyko „zakleszczenia się" materiału w narzędziu po drugim takcie oraz ze względu na duże obciążenie narzędzi na skutek trudności z wypełnieniem naroży sześciokątnego łba materiałem. Wielostanowiskowe maszyny do spęczania na zimno mają szersze możliwości technologiczne. Pozwalają one poprawić jakość wytwarzanych wyrobów i stabilność procesu. Jednakże proces ma również wady, do których należą: duże odkształcenie łba, niekorzystne warunki płynięcia metalu w procesie formowania sześciokąta (naprężenia rozciągające wzdłuż krawędzi), powodujące powstawanie pęknięć i nieciągłości w łbie, a zwłaszcza w zagłębieniach. Proces charakteryzuje się dużym obciążeniem narzędzia podczas formowania sześciokąta. W produkcji śrub kołnierzowych, wg [9, 10], najczęściej stosuje się procesy przewężania (redukcji) i spęczania. W produkcji śrub kołnierzowych redukcja, w porównaniu ze spęczaniem, pozwala zmniejszyć nakład pracy i wydłużyć trwałość narzędzi formujących. Warunki płynięcia metalu podczas formowania łba sześciokątnego ulegają poprawie, co zapewnia dobrą jakość krawędzi łbów śrub. Zatem proces produkcji łba sześciokątnego śruby kołnierzowej poprzez redukcję w porównaniu ze spęczaniem i wykrawaniem krawędzi pozwala na produkcję wysokiej jakości łbów śrub sześciokątnych wraz z wysoką trwałością narzędzia formującego. Najbardziej obiecującą i szeroko stosowaną w ostatnich latach technologią produkcji śrub kołnierzowych jest technologia, która obejmuje formowanie śruby z łbem sześciokątnym poprzez redukcję [8].

Każdy przypadek kucia specjalnego wyrobu śrubowego wymaga indywidualnej analizy naprężeń, odkształceń oraz sił działających w procesie, gdyż przenoszenie parametrów technologicznych z jednego wyrobu na inny, zwłaszcza w przypadku wyrobów specjalnych o charakterystycznym, skomplikowanym zarysie daje błędne rezultaty i może prowadzić do powstawania wad wyrobów. Literatura dotychczas koncentrowała się głównie na śrubach standardowych, czy kołnierzowych, co podkreśla konieczność prowadzenia badań dla nowych kształtów i geometrii wyrobów w celu zapewnienia właściwej jakości wyrobu, wytrzymałości narzędzi oraz stabilności procesu.

1.2.2. Walcowanie gwintów

W końcowym etapie po procesie kucia następuje formowanie gwintu. Gwinty wykonywane są głównie metodą walcowania chodź powszechna jest również metoda nacinania pojedynczym ostrzem. Walcowanie gwintów jest procesem formowania na zimno, w którym szczęki walcownicze lub walce nadają gwint trzpieniom śrub. W procesie walcowania wykorzystuje się hartowane matryce o odwróconym profilu gwintu (rys.1.2.2.1.); nacisk podczas obrotu półfabrykatu wymusza plastyczne płynięcie materiału, dzięki czemu powstaje jednolity i gładki gwint [11].



Rys. 1.2.2.1. Zasada procesu walcowania gwintu przedstawiona w formie schematu [11]

Nacinanie gwintów jest procesem skrawającym, co powoduje ubytek materiału i osłabienie wytrzymałości elementu. Głównym czynnikiem różnicującym wytrzymałość gwintu, a więc także bezpieczeństwo elementu, jest przebieg włókien materiału. Podczas nacinania gwintu, dochodzi do przerwania ciągłości włókien materiału, jednocześnie układ struktury materiału pozostaje niezmieniony. W przypadku procesu walcowania, materiał płynie wzdłuż linii kształtu gwintu odwzorowanego na walcach bądź szczękach, tworząc profil o wymaganych wymiarach i kącie, co znacząco poprawia wytrzymałość na rozciąganie (10- 20%), zmęczenie czy zużycie w porównaniu do gwintów ciętych [12].

Walcowanie gwintów zapewnia wyższą dokładność wymiarową, lepszą jakość powierzchni oraz oszczędność materiału w porównaniu z nacinaniem gwintów. Dzięki możliwości automatyzacji i szybkiego przetwarzania walcowanie jest szczególnie korzystne w produkcji seryjnej elementów o skomplikowanej geometrii. W większości przypadków kuźniarki są połączone z walcarkami, tworząc tzw. kombajn kuźniczy, co pozwala na zintegrowaną i wydajną produkcję elementów z gwintem. Dodatkowo, zastosowanie śrub walcowanych pozwala zredukować koszty pośrednie procesu nawet o 85% [13].

1.3. Narzędzia do kucia śrub na kuźniarkach

Znaczącym etapem procesu kucia matrycowego jest projektowanie i wytwarzanie matryc, które stanowią część know-how producenta. Do ich wykonania najczęściej wykorzystuje się stale narzędziowe o wysokiej wytrzymałości i odporności na zużycie. W odróżnieniu od kucia swobodnego, kucie matrycowe jest powszechnie stosowane w produkcji seryjnej, gdzie wymagana jest powtarzalność i dokładność wymiarowa wyrobów.

Jak opisano w rozdziale 1.2.1, w procesie kucia na zimno, metalowy półfabrykat umieszcza się pomiędzy matrycami, następnie prasa zwykle mechaniczna lub hydrauliczna, uderza szybko i mocno w obrabiany przedmiot, powodując jego plastyczne odkształcenie i przyjęcie kształtu gniazda matrycy. W zależności od złożoności kształtu części może być potrzebnych wiele operacji kucia przy użyciu różnych zestawów matryc.

Klasyfikacja matryc według ich przeznaczenia [14]:

1- Matryce do spęczania: Służą do zwiększania średnicy materiału, np. do formowania łbów śrub lub kołnierzy.
2- Matryce do wyciskania (progresywne i wsteczne): Służą do zmniejszania średnicy lub tworzenia gniazd wewnętrznych. Wyciskanie progresywne zmniejsza średnicę i wydłuża element, natomiast wyciskanie wsteczne tworzy otwory.
3- Matryce do obcinania/przycinania: Kształtują zewnętrzne cechy elementu. Często stosowane do tworzenia np. łbów sześciokątnych śrub.
4- Matryce do wykonywania gniazd: Wykorzystywane do formowania wewnętrznych wgłębień, np. pod gniazda sześciokątne (hex) lub Torx.

5- Matryce do ostrzenia i prostych otworów: Służą do wstępnego kształtowania.
6- Matryce do formowania nakrętek: Specjalistyczne matryce używane w wieloetapowej produkcji nakrętek.

Klasyfikacja matryc według ich konstrukcji [14]:

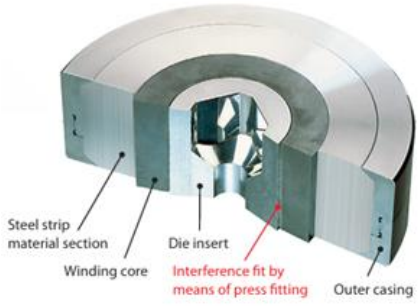
1- Matryce lite: Wykonane w całości z jednego elementu (np. rys. 1.3.1.).
2- Matryce segmentowe: Składają się z kilku wkładek. Stosowane są głównie przy skomplikowanych kształtach i ułatwiają konserwację oraz wymianę segmentów (rys. 1.3.2.). Matryce segmentowe nieruchome zachowują stałą pozycję segmentów podczas kucia, natomiast matryce segmentowe ruchome pozwalają na przesuwanie segmentów, ułatwiając formowanie bardziej skomplikowanych kształtów i wyjmowanie odkuwek.
3- Matryce z wkładkami węglikowymi w stalowej obudowie: popularny typ, w którym rdzeń z twardego węglika osłonięty jest plastyczną, wytrzymałą stalową obudową. Konstrukcja ta pozwala na kontrolę naprężeń i zapobiega nagłej awarii narzędzia (rys. 1.3.3.).



Rys. 1.3.1. Przykład matrycy stałej, wykonanej w całości z węglika wolframu [15]



Rys. 1.3.2. Przykład matrycy segmentowej do produkcji nakrętek [16]



Rys. 1.3.3. Przykład matrycy z wkładką z węglika spiekanego w obudowie stalowej [17]

Zastosowanie matryc pełnych (rys. 1.3.1.) z węglika wolframu jest szczególnie korzystne w przypadku narzędzi o niewielkich gabarytach oraz w procesach technologicznych, w których generowane siły kucia nie przekraczają wartości wymagających zastosowania stalowej obudowy [15].

Podstawowe właściwości matryc z wkładkami wykonanymi z węglików spiekanych, obejmują przede wszystkim wysoką wytrzymałość mechaniczną, warunkującą zdolność narzędzia do przenoszenia wielokrotnie powtarzających się obciążeń bez utraty geometrii oraz bez wystąpienia uszkodzeń strukturalnych. Istotnym parametrem tego typu matryc, jest również odporność na zużycie ścierne, gdyż intensywne oddziaływanie kontaktowe prowadzi do powstawania mikropęknięć i degradacji warstwy wierzchniej, co w konsekwencji determinuje trwałość eksploatacyjną narzędzia. Równocześnie matryce te charakteryzują się stabilnością wymiarową i termiczną. Praca w zmiennych warunkach temperaturowych może powodować odkształcenia, które z kolei skutkują odchyłkami wymiarowymi wytwarzanych elementów [18].

Wstępne naprężenie jest jednym z głównych czynników wpływających na żywotność narzędzia kuźniczego. W celu wywołania naprężeń ściskających na wkładkach matrycowych ze stali lub węglika wolframu (rys. 1.3.3.) stosuje się systemy z jednym, dwoma lub, w rzadkich przypadkach, trzema pierścieniami, aby wyeliminować lub zminimalizować naprężenia rozciągające pod obciążeniem. Ze względu na niską twardość konwencjonalnych pierścieni ściskających ze stali osiągalne wstępne naprężenie jest ograniczone i nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie naprężeń rozciągających, co skutkuje niską żywotnością matrycy.

Rodzaj matrycy przedstawionej na rys. 1.3.3., stanowi rozwiązanie konstrukcyjne, w którym uzyskanie wysokiej wytrzymałości osiągnięto poprzez zastosowanie taśmy stalowej nawijanej na pierścień wewnętrzny wykonany z wysokostopowej stali narzędziowej bądź węglika wolframu. Taka konfiguracja materiałowa umożliwia efektywne przenoszenie obciążeń oraz zwiększa odporność narzędzia na uszkodzenia eksploatacyjne.

Kształtowanie przy użyciu matryc segmentowych (rys. 1.3.2) pozwala na wytwarzanie elementów z kilkukrotnymi spęczaniami, rowkami, otworami formowanymi lub przebijanymi na różnych osiach oraz z cechami niesymetrycznymi z przesuniętymi osiami [19].

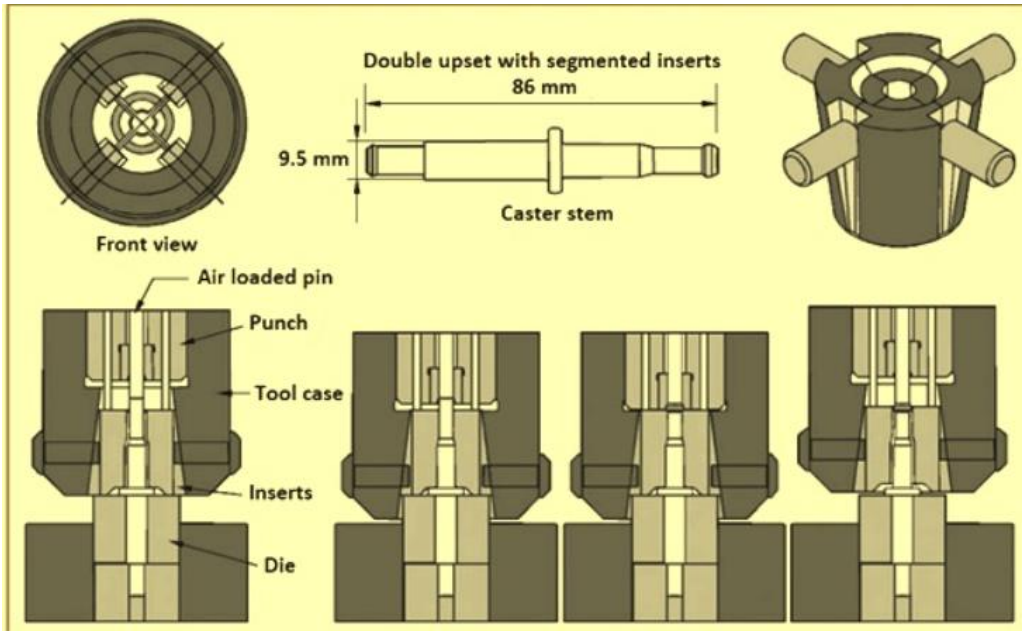
Matryce segmentowe składają się z kilku ruchomych segmentów, które podczas procesu kucia zamykają się synchronicznie wokół wsadu, nadając mu końcowy kształt, a po zakończeniu operacji rozsuwają się, umożliwiając bezproblemowe wyjęcie odkuwki. W przeciwieństwie do klasycznych matryc dwudzielnych, segmenty mogą wykonywać ruch promieniowy lub osiowy, co znacząco zwiększa swobodę projektowania narzędzi oraz pozwala na kształtowanie złożonych profili i elementów osiowo-symetrycznych bez

konieczności stosowania dodatkowych operacji obróbki skrawaniem. Zastosowanie matryc segmentowych sprzyja również bardziej równomiernemu rozkładowi odkształceń i naprężeń w materiale, poprawie własności mechanicznych odkuwek oraz zwiększeniu efektywności procesu technologicznego. Ponadto rozwiązania segmentowe ułatwiają wymianę zużytych części matrycy, skracając przezbrojenia oraz obniżając koszty eksploatacji narzędzi.

W literaturze dostępne są opisy matryc segmentowych stosowanych w technologiach kucia śrub, np. [2, 6]. Najczęściej składają się one z kilku precyzyjnie dopasowanych części roboczych umieszczonych w pierścieniowym korpusie, rozmieszczonych symetrycznie wokół osi kucia. Każdy segment odpowiada za określoną część kształtu łba śruby, co pozwala na równomierne rozłożenie obciążeń w strefie kontaktu z odkuwką [20]. Segmenty te są precyzyjnie dopasowane i osadzone w gnieździe korpusu, który utrzymuje ich pozycję w trakcie obciążenia, a jednocześnie umożliwia ich niewielki ruch promieniowy. Podczas zamykania matrycy segmenty układają się wokół kutego elementu, pozwalając materiałowi w pełni wypełnić strefy o zróżnicowanych przekrojach i redukując ryzyko powstawania pustek czy niewypełnień. Poszczególne segmenty są dociskane do siebie za pomocą sprężyn zamykających, które utrzymują matrycę w pozycji roboczej podczas formowania. Sprężyny te, umieszczone pomiędzy segmentami a korpusem matrycy, zapewniają równomierne rozłożenie sił promieniowych, a po zakończeniu procesu umożliwiają samoczynny powrót segmentów do pozycji wyjściowej, co ułatwia przeniesienie wyrobu do kolejnej operacji [21].

Rys. 1.3.4. pokazuje, w jaki sposób można uzyskać wielokrotne spęcznienia za pomocą matryc segmentowych i tłoka pneumatycznego. Tłocznik pneumatyczny wciska półfabrykat do matrycy, podczas gdy pozostałe elementy narzędzia tłoczącego przemieszczają się w kierunku matrycy. Wkładki są zamykane poprzez ruch osiowy wzdłuż stożkowych rowków, ponieważ obudowa tłocznika styka się ze stacjonarną matrycą. Gdy ruchome segmenty matrycy osiągną pozycję całkowicie zamkniętą, narzędzie tłoczące zostaje unieruchomione i powstaje wnęka o pożądanym kształcie nowego spęcznienia. Dalsze przesuwanie tłocznika powoduje spęcznienie drugiej głowicy. Cykl zostaje zakończony, gdy obudowa stempla zaczyna się cofać od nieruchomej matrycy, segmenty wkładki są przesuwane do pozycji otwartej przez wypychacz w stemplu, a trzpień stempla pozostaje w pozycji przedniej, aby utrzymać półfabrykat wciśnięty w matrycę. Obrót półfabrykatu jest funkcją oprzyrządowania, która obraca obrabiany element

z pozycji poziomej do pionowej, umożliwiając wykonywanie operacji formowania pod kątem 90 stopni do pierwotnej osi.



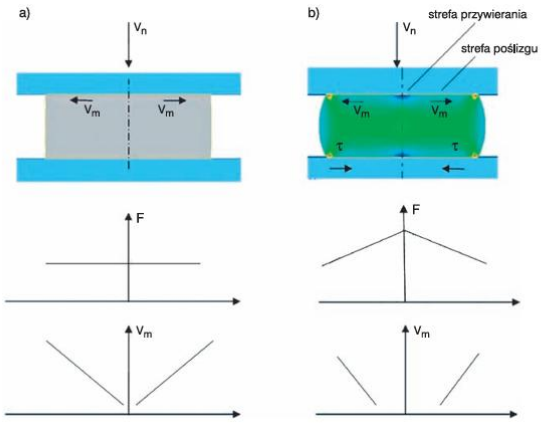
Rys. 1.3.4. Sekwencja operacji spęczniania drugiej głowicy trzpienia odlewanego z zastosowaniem segmentowych wkładek narzędziowych. [19]

1.4. Zużycie narzędzi

Matryce do kucia na zimno montowane są w procesie skurczowego pasowania w celu zapewnienia odporności na wysokie obciążenia [22]. Jednakże w wyniku powtarzających się naprężeń ściskających ostatecznie dochodzi do ich zmęczeniowego uszkodzenia. Większość prób prognozowania żywotności matryc opiera się na metodzie elementów skończonych (MES) [23] [24] [25]. Prognozy oparte na MES to idealny wynik, który nie uwzględnia różnych zmiennych, takich jak ustawienie matrycy, odchyłki wymiarów materiału i temperatura pracy. Opracowanie [26], wskazuje na system monitorowania danych obciążeniowych generowanych przez urządzenia kuźnicze, oparty na czujnikach piezoelektrycznych. Ponadto, dzięki wykorzystaniu pomiarów siły kształtowania prowadzonych w czasie rzeczywistym, można precyzyjnie oszacować trwałości matryc oraz wdrożyć systemu zarządzania ich żywotnością, umożliwiający wyznaczanie cyklu wymiany narzędzi. Rozwiązanie zaproponowane w pracy [26], mogłoby być z powodzeniem zastosowane w firmach produkcyjnych, w których procesy produkcyjne są wspierane przez procesy badawczo – rozwojowe.

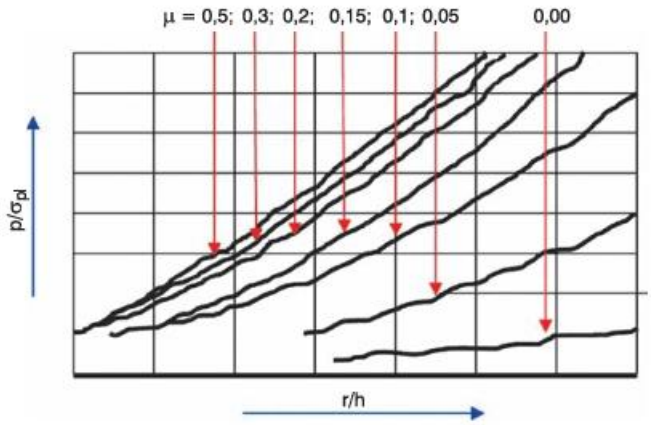
W procesie kształtowania śrub znaczącą rolę odgrywa tarcie między materiałem półfabrykatu a narzędziem formującym, np. matrycą. Nadmierne tarcie może prowadzić do lokalnego nagrzewania i zacierania adhezyjnego, co skutkuje uszkodzeniem powierzchni i obniżeniem jakości wyrobu jak również uszkadzaniem przestrzeni roboczej narzędzi. Zacieranie adhezyjne można określić jako postępujące uszkadzanie warstwy wierzchniej trących się elementów spowodowane przeniesieniem się tarcia z powierzchni w głąb tej warstwy wskutek powstawania i niszczenia ognisk zacierania adhezyjnego. Postępujące z coraz większą intensywnością zacieranie adhezyjne może doprowadzić do unieruchomienia pary trącej czyli do zatarcia [27]. Na podstawie analiz przeprowadzonych przez Nosala [27] można wnioskować, że odporność powierzchniową elementu można kształtować poprzez odpowiednią obróbkę wierzchniej warstwy metalu, np. poprzez zmianę twardości powierzchni, modyfikację struktury powierzchniowej czy zastosowanie powłok zmniejszających adhezję. Ponadto właściwe smarowanie i kontrola parametrów tarcia pozwalają ograniczyć rozwój niekorzystnych efektów adhezyjnych.

Oddziaływanie tarcia w procesach kucia ma fundamentalne znaczenie dla płynięcia metalu w kotlinie odkształceń. Determinuje ono stopień wypełniania wykroju matrycy, wpływa na rozkład temperatury oraz wielkość odkształcenia plastycznego kształtowanego materiału. W konsekwencji rzutuje na jakość powierzchni wyrobu gotowego, powstawanie nieciągłości wewnętrznych i wad powierzchniowych, a także wywiera wpływ na stopień zużycia narzędzi kuźniczych. W procesach kucia opory tarcia są relatywnie wysokie (μ = 0,2–0,4), co wynika przede wszystkim z obecności znacznych ilości zgorzeliny na powierzchni materiału oraz ograniczonej skuteczności smarowania w procesie [2]. Płynięcie materiału, determinowane warunkami tarcia, jest odmienne dla procesów kucia swobodnego i matrycowego. Schemat działania sił tarcia w procesie swobodnego spęczania pręta, rozkłady prędkości i nacisków na powierzchni styku odkuwki z narzędziem przedstawiono na rys. 1.4.1.



Rys. 1.4.1. Schemat oddziaływania sił tarcia, rozkład nacisków i prędkości w procesie spęczania pręta: a) bez tarcia, b) z występowaniem tarcia; V_n – prędkość ruchu narzędzia, V_m – prędkość ruchu odkształcanego materiału [2]

Przemieszczanie się odkształcanego metalu względem powierzchni narzędzia jest determinowane przez opory tarcia, które ograniczają jego swobodę ruchu. W zależności od warunków kontaktu, charakter tego ruchu może przyjmować formę od pełnego poślizgu aż do stanu całkowitego przylegania (adhezji) materiału do powierzchni roboczej narzędzia. W centralnej części odkuwki w osi symetrii występuje punkt, w którym prędkość równa się zeru (punkt neutralny). Jeżeli odkształcenie odbywa się w warunkach bez udziału tarcia (rys. 1.4.1.a), wówczas przemieszczenie materiału odbywa się z prędkością rosnącą w sposób liniowy w kierunku promienia, natomiast nacisk materiału na narzędzie ma stałą wartość, równą wartości naprężenia uplastyczniającego. Wraz ze zmniejszaniem wysokości odkształcanego metalu wzrasta jego średnica, przy zachowaniu prostoliniowości tworzących walca [2]. W rzeczywistym procesie spęczania (rys. 1.4.1.b), występują siły tarcia, przez co rozkład sił, prędkości i nacisków jest inny. W centralnej części odkuwki występuje wówczas przywieranie, natomiast przemieszczeniu ulegają wyłącznie zewnętrzne warstwy materiału. Występowanie oporów tarcia powoduje powstawanie obszarów o zróżnicowanej wielkości odkształcenia plastycznego w objętości materiału. Dowodem nierównomierności odkształceń podczas spęczania wywołanych zjawiskiem tarcia jest beczkowatość spęczanego elementu. Istotny wpływ na wartość nacisków jednostkowych, poza oporami tarcia, wywiera także stosunek średnicy (r) do wysokości spęczanego elementu (h). Przy dużych stosunkach r/h i dużych oporach tarcia, średnie naciski jednostkowe są wielokrotnie większe od granicy plastyczności odkształcanego metalu (rys. 1.4.2).

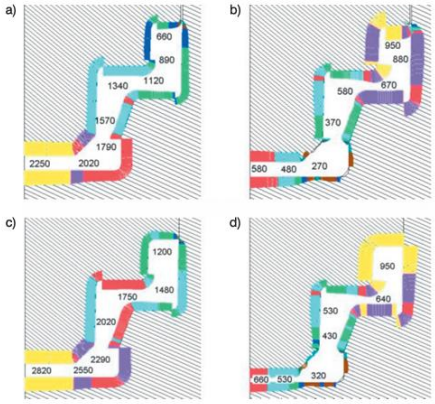


Rys. 1.4.2. Zależność nacisków od wymiarów próbki i współczynnika tarcia: p- średni nacisk jednostkowy, σ_{pl} – naprężenie uplastyczniające, μ - współczynnik tarcia, r – promień, h – wysokość [2]

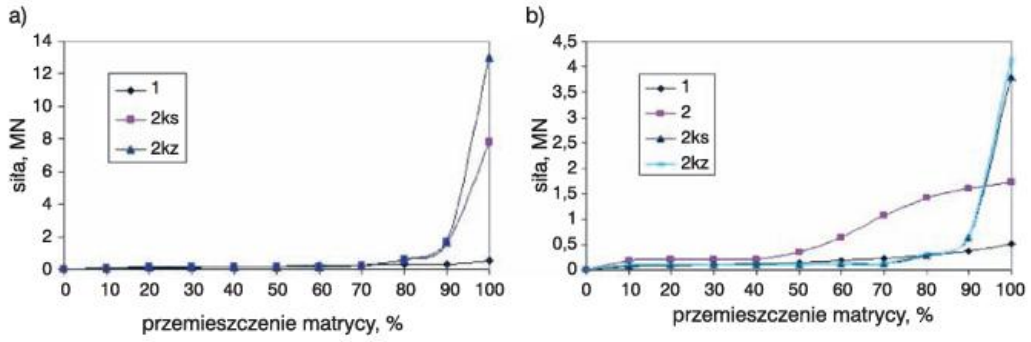
Wpływ tarcia w procesach kucia matrycowego ma znacznie bardziej złożony charakter niż w przypadku kucia swobodnego, co wynika z warunków geometrycznych wykroju oraz bardziej skomplikowanego toru płynięcia metalu w zamkniętej przestrzeni matrycy. Na powierzchniach bocznych wykrojów, tarcie oddziałuje niekorzystnie - hamując płynięcie materiału, a tym samym dobre wypełnienie wykroju. Można wyodrębnić również takie obszary wykroju matrycy, gdzie tarcie ma korzystny wpływ, np. w mostku wypływki, gdzie hamowanie płynięcia metalu na zewnątrz wykroju sprzyja dobremu wypełnieniu wykroju.

W wyniku oddziaływania obciążeń mechanicznych oraz cieplnych matryce stosowane w procesie kucia ulegają zmianom wymiarowym, co bezpośrednio przekłada się na dokładność geometryczną wytwarzanych odkuwek. Jest to szczególnie istotne w przypadku produkcji odkuwek dokładnych, tj. bez naddatków na obróbkę mechaniczną. Ważnym aspektem, który należy uwzględnić przy projektowaniu procesów kucia dokładnego, jest określenie stosunku stopnia wypełnienia wykroju matrycy do wielkości nacisków jednostkowych i sił kucia. Znajomość wielkości siły nacisku w funkcji drogi odkształcania jest elementarne w przypadku kucia odkuwek zarówno w matrycach otwartych, jak i zamkniętych, gdzie w końcowej fazie procesu kucia występują z reguły duże obciążenia mechaniczne. Ograniczenie wysokich nacisków jednostkowych w pewnych obszarach wykroju matrycy ogranicza możliwość uszkodzenia narzędzi, jak również niekorzystnych przeciążeń maszyny kuźniczej. Rozkład obciążeń działających na narzędzia ma bezpośredni wpływ na tempo i charakter ich zużycia.

W zależności od kształtu odkuwki, największy wpływ na wymaganą końcową siłę kucia ma konstrukcja matrycy lub sposób prowadzenia procesu kucia. Np. dla odkuwki przedstawionej na rys. 1.4.3. konstrukcja matrycy nie ma tak istotnego wpływu na wymaganą końcową siłę nacisku, jak sposób prowadzenia procesu kucia. Proces dwuzabiegowy dla przykładowej odkuwki wymaga prawie trzykrotnie większej siły nacisku w końcowym etapie kucia w porównaniu z procesem trójzabiegowym (rys. 1.4.4).



Rys. 1.4.3. Rozkład nacisków jednostkowych (MPa) na powierzchni wykroju końcowego w ostatnim etapie kucia w procesie: dwuzabiegowym (a, c) w matrycy: otwartej (a) i zamkniętej (c) oraz trójzabiegowym (b, d) w matrycy: otwartej (b) i zamkniętej (d) [2]



Rys. 1.4.4. Siła w procesie kucia: a) w dwóch zabiegach, b) w trzech zabiegach w wykroju otwartym (s) i zamkniętym (z) [2]

Wysokie siły nacisku w procesie kucia dwuzabiegowego wynikają przede wszystkim z dużych wartości nacisków jednostkowych występujących w rejonie denka odkuwki (rys. 1.4.3a i rys. 1.4.3c). Dla procesu kucia trójzabiegowego maksymalne naciski jednostkowe występują w obszarze zamka matrycy (rys. 1.4.3b i rys. 1.4.3d). Wymuszone przemieszczanie odkształcanego metalu w końcowym etapie kucia jest przyczyną znacznego miejscowego obciążenia matrycy. W procesie dwuzabiegowym w końcowym etapie kucia metal przemieszcza się z obszaru denka w kierunku zamka. Natomiast

w procesie trójzabiegowym w końcowej fazie kucia tworzy się korzystna strefa zmiany kierunku płynięcia metalu, eliminująca wymuszone, jednokierunkowe przemieszczanie materiału. Dodatkową korzyścią trójzabiegowej technologii jest zmniejszone tarciowe zużycie narzędzi.

Powszechnie znane są sposobów poprawy trwałości narzędzi, takie jak: stosowanie drogich materiałów na narzędzia i ich obróbka cieplna, powłok, obróbki powierzchniowej oraz dobór odpowiedniego smaru. Szerokie możliwości poprawy żywotności narzędzi zapewnia również dopracowanie schematu płynięcia metalu. Ma to istotne znaczenie w procesach kucia precyzyjnego, gdzie oprócz aspektów ekonomicznych, zużycie narzędzi wpływa na dokładność kucia, decydując o wytworzeniu wyrobu zgodnego z wymaganiami. Właściwa interpretacja mechanizmów zużycia zachodzących w narzędziu podczas kucia, przy znajomości parametrów stanu naprężeń i odkształceń zarówno w narzędziu jak i w materiale poddanym odkształceniu, pozwala określić możliwości minimalizacji zużycia poprzez zmianę technologii kucia. Np. badania metalograficzne stempla kształtującego, opisane w rozdziale 6 pracy prof. Sińczaka [2], w połączeniu z symulacją numeryczną procesu kucia pozwoliły zidentyfikować mechanizmy powstawania pęknięć w warstwie przypowierzchniowej narzędzia, wynikające z jednostronnego płynięcia metalu w obszarze piasty (nierównomierność etapów wypełnienia w dolnej i górnej części odkuwki piasty) i oddziaływań tribologicznych. Na tej podstawie zmodyfikowano kształt przedkuwki, zapewniający zrównanie stadiów wypełniania wykroju w dolnej i górnej jego części i redukowanie naprężenia powierzchniowego (o około 30%), minimalizując zużycie stempla i prognozując istotne zwiększenie jego trwałości. Powstanie podziału kierunku płynięcia, w wyniku modyfikacji narzędzia, ze strefą neutralną w obszarze karbów konstrukcyjnych minimalizuje jeden z warunków koniecznych do zużycia ściernego, jakim jest intensywne przemieszczanie materiału pod naciskiem. W związku z powyższym trwałość stempla powinna ulec nawet ponad dwukrotnemu zwiększeniu.

Matryce to narzędzia, które całkowicie lub częściowo obejmują negatywny kontur przedmiotu obrabianego i przekazują go przedmiotowi obrabianemu podczas odkształcania. W układzie kształtowania plastycznego wszystkie interakcje zachodzą między przedmiotem obrabianym a matrycą. Z powodu tego bezpośredniego kontaktu, na matryce wywierane są naprężenia, które są spowodowane siłami procesu, ciepłem i ruchem materiału (co powoduje zużycie tarciowe powierzchni). W zależności od wielkości

naprężenia i granicy wytrzymałości materiału, matryca wytrzymuje warunki pracy lub ulega uszkodzeniu.

Istnieją metody [28] umożliwiające symulację warunków zmęczeniowych narzędzi stosowanych w procesach kształtowania. Pozwalają one na odwzorowanie rzeczywistych obciążeń oraz analizę zachowania narzędzi, w tym inicjacji i propagacji pęknięć.

Zużywanie się narzędzi w znacznym stopniu przyczynia się do pogorszenia jakości wytwarzanych odkuwek. Najczęściej występujące wady wynikające z tego zjawiska to problemy z prawidłowym wypełnieniem wykroju matrycy, takie jak: niedokucia, zakucia, zadziory, skrzywienia, rysy, rozwarstwienia oraz pęknięcia o różnej skali (mikro i makro). Wady te mają bezpośredni wpływ na właściwości użytkowe i funkcjonalność gotowego wyrobu uzyskanego z odkuwki [29]. Z dostępnych źródeł literaturowych wynika, że około 70% matryc kuźniczych (pracujących w rożnych warunkach smarowania i chłodzenia) jest wycofywanych z eksploatacji z powodu utraty wymiarów wynikającej ze zużycia ściernego oraz odkształceń plastycznych [30]. Około 25% matryc przestaje być używanych na skutek pęknięć zmęczeniowych, natomiast pozostałe 5% z innych przyczyn, takich jak nieprzestrzeganie zaleceń technologicznych, wady konstrukcyjne, błędy materiałowe czy nieprawidłowości w procesach obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej [31]. W przypadku procesów kucia matrycowego na gorąco, dla narzędzi nagrzewanych (azotowanych) i chłodzonych dominującym mechanizmem niszczącym jest zmęczenie cieplno-mechaniczne, a nie zużycie ścierne [29]. Natomiast, w przypadku, gdy narzędzia nie są smarowane i chłodzone udział procentowy zużycia ściernego jest dominujący, wzrasta również udział odkształceń plastycznych [29]. W sytuacji, gdy narzędzia są smarowane, ale nie posiadają ochronnej warstwy w postaci azotowania, głównym mechanizmem ich uszkodzeń pozostaje zmęczenie cieplno-mechaniczne. Jednak wraz ze wzrostem liczby wykonanych odkuwek coraz większe znaczenie zaczyna odgrywać zużycie ścierne, które staje się dominującym czynnikiem degradacji narzędzi [29]. Zestawy narzędzi kuźniczych, takie jak stemple, matryce czy wkładki matrycowe, projektowane przez konstruktorów i technologów, ulegają zużyciu zazwyczaj znacznie szybciej, niż przewiduje to plan eksploatacyjny. Trwałość tych narzędzi jest w dużym stopniu uzależniona od warunków, w jakich przebiega proces kucia, a także od jakości wykonania narzędzi, właściwie dobranej obróbki cieplnej dostosowanej do zastosowanego materiału, a także od kształtu wstępniaka i przedkuwki [29]. Dodatkowo, silna konkurencja na rynku zmusza producentów odkuwek do ciągłego obniżania kosztów produkcji i jednoczesnego

utrzymywania wysokiej jakości wyrobów, co w konsekwencji prowadzi do dużego zainteresowania kwestią zwiększenia trwałości narzędzi kuźniczych [32].

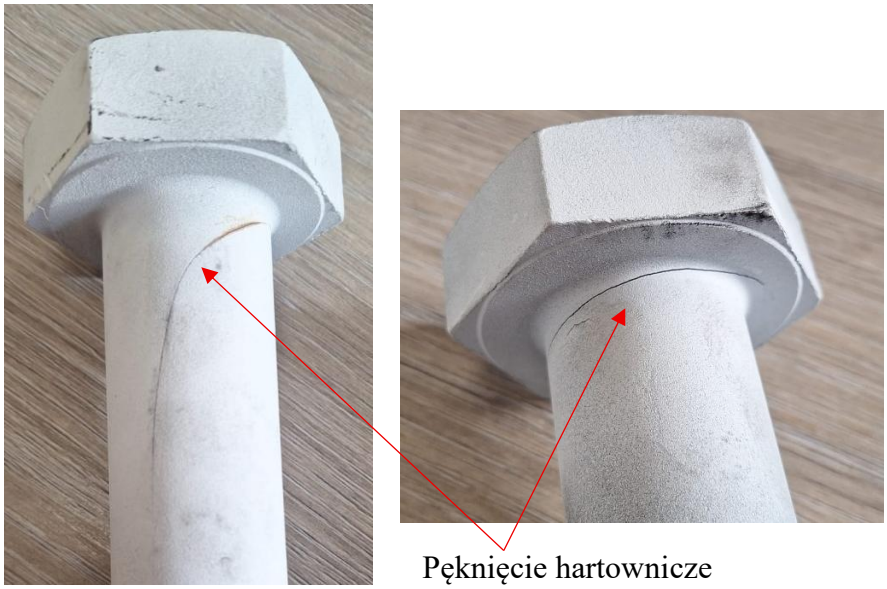
1.5. Wady powstające w procesie kucia

Potencjalne wady powstające w procesie plastycznego kształtowania śrub można sklasyfikować w czterech kategoriach [33]:

1- wady inicjowane przez naprężenie występujące w procesie kształtowania śrub,
2- wady inicjowane przez płynięcie materiału,
3- wady związane z mikrostrukturą, powstałe na skutek wad materiału wejściowego,
4- nieciągłości powierzchniowe będące efektem kontaktu materiału z narzędziami.

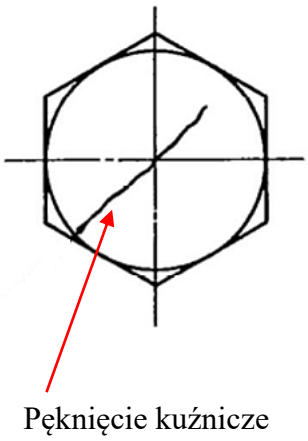
Wady wywołane naprężeniem są spowodowane głównie przez nieprawidłowy stan naprężeń lokalny lub globalny podczas procesu kształtowania. Wady te objawiają się jako przewężenie, pęknięcie, wyboczenie. Mogą być zarówno wadami wewnętrznymi jak i zewnętrznymi. Do pierwszej kategorii nieciągłości zaliczane są pęknięcia hartownicze oraz pęknięcia czy wyrwy kuźnicze [33].

Pęknięcie jest nieciągłością o czystym (krystalicznym) przełomie przechodzącym wzdłuż granic ziaren lub poprzez ziarna i może zaczynać się od wtrąceń ciał obcych. Pęknięcia powstają głównie w wyniku nadmiernych naprężeń metalu podczas kucia (pęknięcia kuźnicze) lub innych procesów takich jak obróbka cieplna (pęknięcia hartownicze) [33]. Pęknięcia hartownicze mogą powstać na skutek nadmiernie wysokich naprężeń termicznych i naprężeń przemiany strukturalnej, przebiegają one w sposób nieregularny na powierzchni elementu złącznego. Przykład pęknięć hartowniczych pokazano na rys. 1.5.1. Tego typu pęknięcia są niedopuszczalne bez względu na głębokość, długość czy położenie. Występowanie pęknięć hartowniczych grozi całkowitą utratą funkcjonalności elementu złącznego.



Rys. 1.5.1. Przykład pęknięć hartowniczych

Pęknięcia kuźnicze na czole łba śruby mogą powstawać już podczas operacji obcinania ucinka drutu do kucia. Tego typu pęknięcia, zaprezentowane na rys. 1.5.2. mogą być dopuszczalne, w zależności od wymiarów pęknięcia.



Rys. 1.5.2. Przykład pęknięcia kuźniczego na czole łba śruby (opracowanie własne na podstawie [33]).

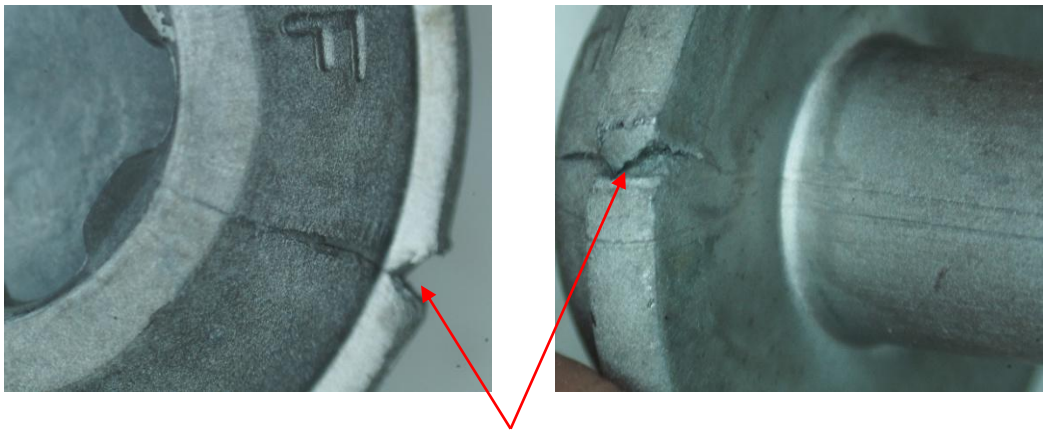
Swoistym rodzajem pęknięć kuźniczych są pęknięcia łbów z gniazdem wewnętrznym typu imbus, Torx. Tego typu pęknięcia powstają na powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych gniazda (napędu), na skutek operacji ucinania ucinka drutu, naprężeń ścinających występujących podczas operacji kucia i wykonywania pogłębienia stożkowego łba [33]. Przykłady pęknięć kuźniczych łbów śrub z gniazdem Torx pokazano na rys. 1.5.3.



Rys. 1.5.3. Przykład pęknięć kuźniczych śrub z gniazdem

Niedopuszczalne są pęknięcia rozciągające się od gniazda do krawędzi zewnętrznej czoła i pęknięcia o przebiegu wskazującym na możliwość przecięcia się.

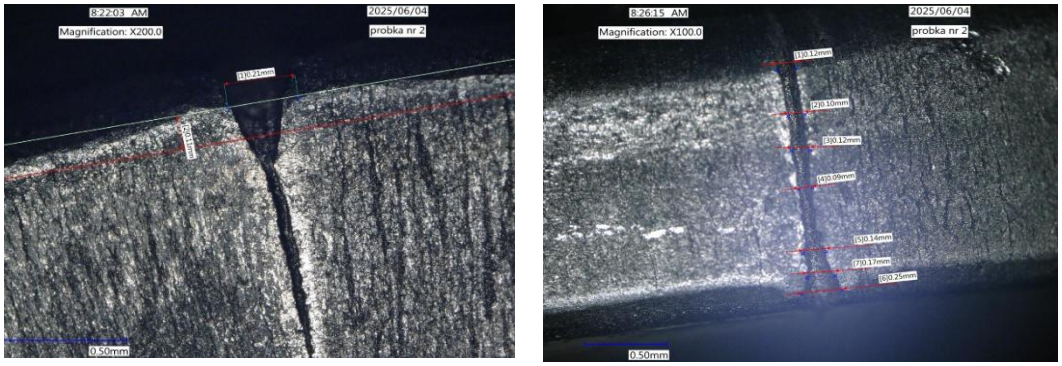
Do pęknięć kuźniczych zalicza się również wyrwy kuźnicze, które stanowią miejscowy brak materiału. Wyrwy kuźnicze mogą powstać na powierzchniach płaskich i narożach łba, na obrzeżach łba okrągłego czy kołnierza jak również na obrzeżu wgłębienia w łbie (rys. 1.5.4).



Rys. 1.5.4. Przykłady wyrw kuźniczych

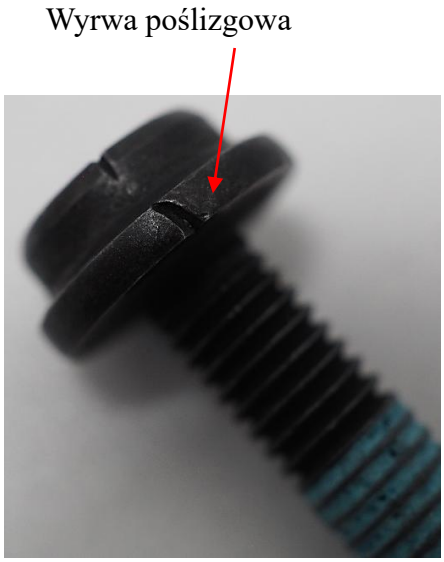
Wyrwy kuźnicze występujące na powierzchni czołowej łba sześciokątnego są dopuszczalne o ile nie zachodzą na ścięcie sześciokąta oraz na powierzchnię oporową pod łbem. Podobnie jak w przypadku pęknięć kuźniczych, norma ISO 6157-3 [33] określa maksymalne wymiary wyrw, które nie stanowią ryzyka utraty funkcjonalności elementu

złącznego. Przykładowe zdjęcie obrazujące sposób pomiaru szerokości wyrwy kuźniczej prezentuje rys. 1.5.5.



Rys. 1.5.5. Pomiar szerokości wyrwy kuźniczej powstałej na łbie śruby

Kolejnym rodzajem defektu powstającego podczas kucia są złomy poślizgowe, występujące pod kątem 45 stopni do osi wyrobu. Przykład złomu poślizgowego pokazano na rys. 1.5.6.



Rys. 1.5.6. Przykład wyrwy poślizgowej

Wady spowodowane płynięciem materiału występują głównie na skutek nieprawidłowego przepływu materiału przy ograniczeniach narzuconych przez narzędzia i obciążenia podczas kształtowania. Wady zewnętrzne tego typu obejmują wyboczenie podczas spęczania, fałdowania, wypływki i niedopełnienia w procesie formowania. Wady

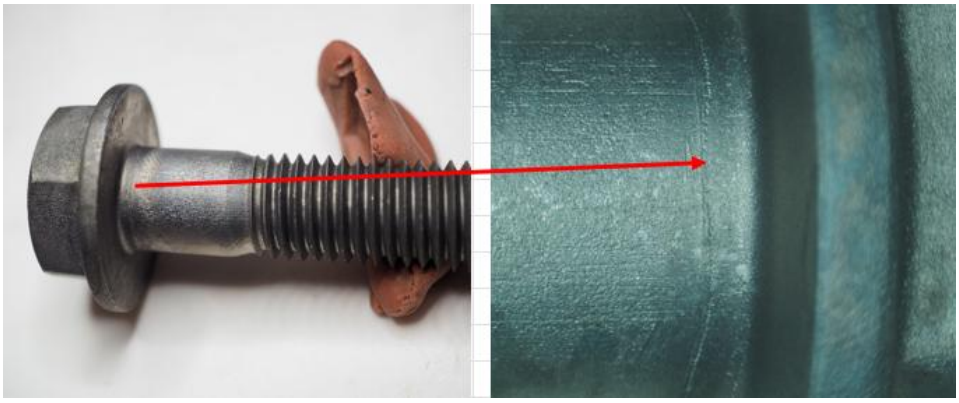
wewnętrzne z kolei obejmują zaburzenia linii przepływu, pęknięcia, zakucia, wewnętrzne fałdowanie. Warto również zauważyć, że wady zatarcia wywołane tarciem należy uznać za problemy z przepływem materiału, często wynikające z niewłaściwej konstrukcji narzędzi, nieprawidłowych ustawień, niewystarczającego smarowania lub nadmiernych prędkości [34].

Powszechnym rodzajem wad powstałym na skutek niewłaściwego płynięcia materiału są nawarstwienia materiału na powierzchni śruby tzw. fałdy. Mechanizmy oraz główne czynniki przyczyniające się do ich powstania, przedstawia tabela 1.5.1.

Tabela 1.5.1. Przegląd wad indukowanych płynięciem materiału wraz z mechanizmem ich powstawania i głównymi czynnikami wpływającymi na ich powstanie [34]

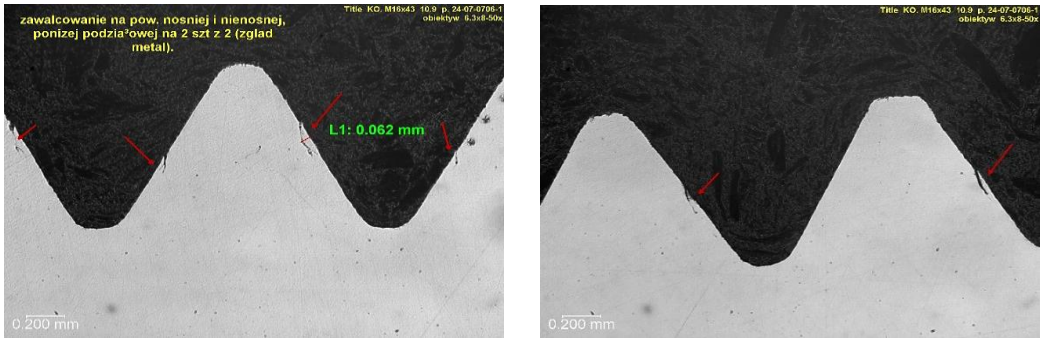
Wada	Mechanizm powstawania	Główne czynniki wpływające na powstanie wady
Niewypełnienia/ ubytki materiału	Niewielkie obciążenia prasy, wysoka wytrzymałość i niska podatność materiałów na obróbkę. Powietrze, gaz lub smar uwięzione w narożach odkuwek.	Nieprawidłowe zaprojektowanie elementów formujących i matryc, takich jak ostre narożniki/wcięcia. Nieodpowiednia kolejność kształtowania, niewystarczające obciążenia odkształcające, zbyt niska temperatura wstępnego podgrzania, nieodpowiednie lub nierównomierne smarowanie, nadmierne chłodzenie matrycy.
Fałdy i zakucia	Łączenie linii płynięcia materiału wewnątrz przedmiotu obrabianego, lokalne fałdowanie powierzchni materiału spowodowane ścinaniem, nieprawidłowy przepływ materiału wywołany przez krawędzie matrycy.	Nieprawidłowe zaprojektowanie elementów formujących i matryc, takich jak ostre kąty.
Niewłaściwy układ linii płynięcia	Niedopuszczalne układy płynięcia materiału, defekty zachodzenia na siebie materiału, nadmierne i szybkie płynięcie metalu oraz strefy trudne do odkształcenia.	Złożoność elementu kształtowanego i konstrukcji matrycy. Nieprawidłowa kolejność przetwarzania, warunki tarcia.

Przykład fałdy występującej na krawędzi zewnętrznej śruby pokazano na rys. 1.5.7.



Rys. 1.5.7. Przykład fałdy występujących na krawędzi zewnętrznej śruby

Swoistym rodzajem fałdy jest zawalcowanie na gwincie. Zawalcowania gwintu cechują się modelową zgodnością na tym samym wyrobie, co oznacza, że zawalcowania będą umiejscowione identycznie i będą mieć taki sam kierunek przebiegu na wszystkich zwojach. Przykład zawalcowania gwintu pokazano na rys. 1.5.8. Niedopuszczalne są zawalcowania w dnie bruzdy gwintu oraz na obciążonej powierzchni nośnej gwintu.



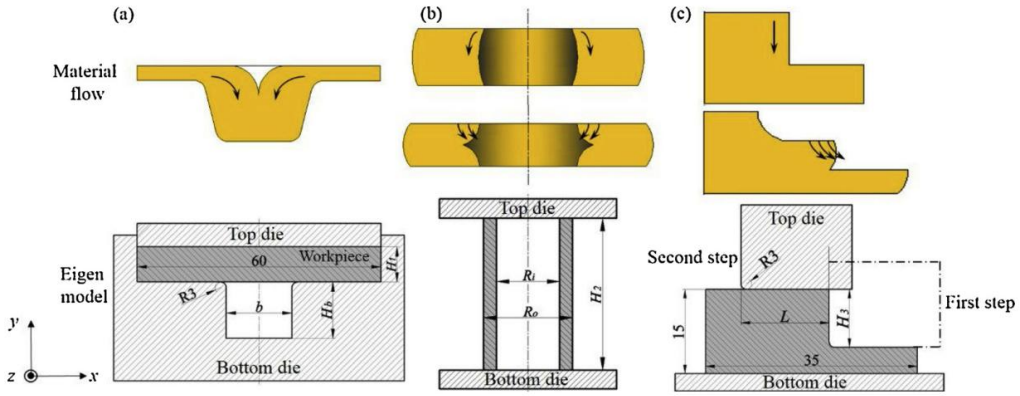
Rys. 1.5.8. Przykład fałdy na gwincie – zawalcowania gwintu

Pękanie oraz fałdowanie materiału należą do najczęściej występujących wad kucia [35], a ich analiza jest bardzo ważna dla optymalizacji parametrów procesu i ograniczenia defektów. Znaczącym czynnikiem wpływającym na pękanie czy fałdowanie śrub jest stopień odkształcenia łba, czyli stosunek spęczenia wysokości łba pierwszej spęczki do spęczenia wysokości łba wyrobu finalnego. Jak wynika z badań [36], istnieją dwa główne miejsca powstawania pęknięć, tj. obszar styku na krawędzi wewnętrznej gniazda oraz obszar blisko krawędzi zewnętrznej łba. Autorzy [36] podają, że zastosowanie wysokiego stopnia przekucia (95%) wraz z łagodnym promieniem matrycy (3mm) obniża ryzyko wystąpienia pęknięć w obszarze krawędzi wewnętrznej gniazda. W obszarze zewnętrznej

krawędzi łba nie stwierdzono podobnej zależności, ze względu na symetryczne płynięcie materiału. Na podstawie analizy wyników wpływu stopnia deformacji łba na fałdowanie materiału, stwierdzono, że im niższy stopień przekucia tym większe ryzyko fałdowania w obszarze łba. W przypadku niższego stopnia deformacji łba (80%) materiał płynie w dół, gdzie dochodzi do fałdowania poprzez gromadzenie się materiału w tym miejscu. W przypadku wyższego stopnia deformacji łba (95%) materiał płynie na zewnątrz i nie gromadzi się wewnątrz gniazda. Wysoki stopień deformacji łba przyczynia się do zmniejszania grubości łba i wpływa na zmianę kierunku płynięcia materiału w obszarze krawędzi gniazda z kierunku w dół na zewnątrz co zapobiega powstawaniu fałdowania. Nie stwierdzono wpływu wielkości promienia matrycy na występowanie fałdowania materiału w obszarze gniazda wewnętrznego.

W publikacjach [37], [35] autorzy badali wpływ parametrów geometrycznych matrycy na płynięcie materiału oraz powstawanie potencjalnych wad fałdowania kołnierza w procesie kucia elementów osiowo symetrycznych z kołnierzem. Autorzy [35] podkreślają, że wady elementów kutych są powodowane niewłaściwym płynięciem materiału oraz nierównomiernym rozkładem naprężeń i temperatur zarówno w elemencie wytwarzanym jak i w narzędziach kształtujących. Na postawie przeprowadzonych badań i symulacji autorzy [35] zaproponowali zastosowanie specjalnej wkładki przesuwnej w matrycy, która umożliwia kontrolowane płynięcie materiału. Istotnym parametrem wpływającym na płynięcie materiału oraz stan odkształcenia jest początkowa pozycja wkładki, współczynnik tarcia oraz sztywność sprężyny ruchomego modułu matrycy [35].

Badania [37], [35] odnoszą się do konkretnych przypadków elementów kutych i mają zastosowanie tylko dla tych przypadków. W artykule [38] opracowano wszechstronne podejście do prognozowania typowych rodzajów wad fałdowania powstających podczas kucia matrycowego. Defekty te powstają w wyniku przemieszczeń materiału spowodowanych brakiem zgodności kształtów i objętości materiału na poszczególnych etapach kucia. Fałdy (folding) powstające podczas kucia matrycowego, przedstawione na rys. 1.5.9, podzielone zostały na trzy typy w zależności od sposobu przepływu materiału [38]: na skutek zbiegania się materiału, składania powierzchni w literę ‘V’, lokalnie ze względu na zależność pomiędzy dwoma powierzchniami.



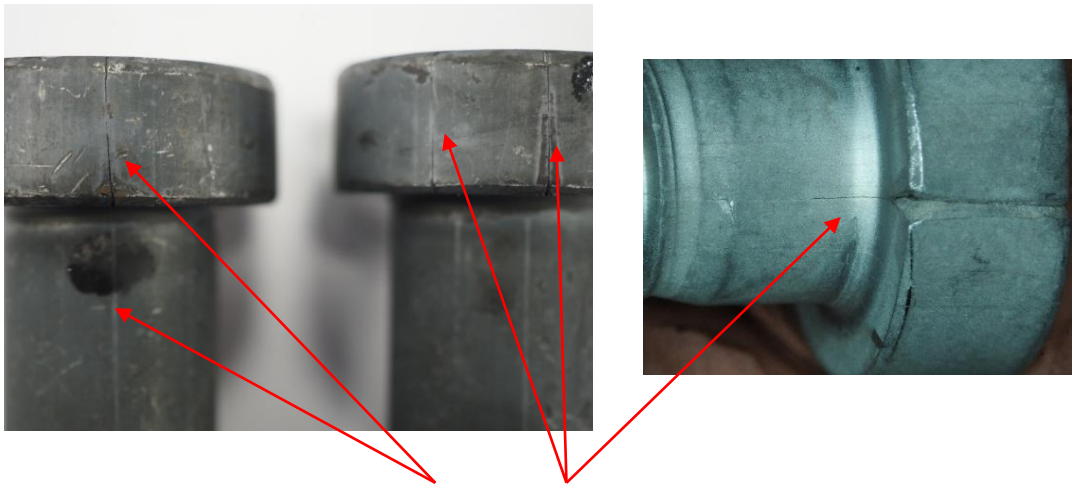
Rys. 1.5.9. Rodzaje wystąpienia fałdowania w procesie kucia, a) na skutek zbiegania się materiału, b) składanie powierzchni w literę 'V', c) lokalnie ze względu na zależność pomiędzy dwoma powierzchniami [38]

Fałdowanie powierzchni, będące efektem zbiegania się materiału (rys. 1.5.9a), powstaje w wyniku lokalnego niedoboru materiału i utworzenia się wklęsłości. Zjawisko fałdowania, wynikające ze składania się materiału (rys. 1.5.9b), dotyczy wydłużonych, cienkich fragmentów poddanych dużym ściskającym odkształceniom. Przemieszczanie się materiału powoduje formowanie się wgłębienia w kształcie litery „V". W przypadku fałdowania wynikającego z koncentracji obciążenia (rys. 1.5.9c), początkowym etapem jest powstanie miejscowego wybrzuszenia obwodowego oraz uskoków osiowych w obrabianym obszarze. Podczas kolejnej odkuwki te deformacje są zagęszczane, prowadząc do formowania trwałej fałdy. W artykule [38] przedstawiono trzy modele opisujące poszczególne typy fałd, na ich podstawie opracowano i zweryfikowano wszechstronne podejście predykcyjne dla wszystkich trzech typów defektów fałdowania. Autorzy [38] określili wskaźnik fałdowania (folding index) na podstawie wzrostu lokalnej prędkości odkształcenia w miejscu, w którym występowała tendencja do fałdowania. Folding index jest numerycznym wskaźnikiem pozwalającym przewidywać skłonność materiału do tworzenia fałd podczas procesu odkształcania plastycznego, na podstawie analizy prędkości odkształcenia i zmian powierzchni w czasie. Wskaźnik ten pozwala na ilościowe określenie ryzyka wystąpienia fałdowania oraz stopnia zaawansowania fałdowania. Równocześnie dla każdego z określonych typów fałdowania, zaproponowano kryteria oceny fałdowania na podstawie wskaźnika fałdowania. Następnie wskaźnik fałdowania skorelowano z parametrami kucia metodą metamodelowania, która polega na budowie szybkiego, uproszczonego modelu matematycznego, który zastępuje złożoną symulację numeryczną w analizie procesów inżynierskich. Metamodel powstaje na

podstawie wyników uzyskanych z ograniczonej liczby dokładnych symulacji, które stanowią dane uczące. Następnie model ten interpoluje lub aproksymuje wyniki w całej analizowanej przestrzeni projektowej. Metoda ta jest szczególnie przydatna w problemach wieloparametrowych, gdzie liczba możliwych kombinacji zmiennych jest bardzo duża [39]. Ponadto wskaźnik fałdowania może służyć jako funkcja do doskonalenia parametrów kucia, mająca na celu zminimalizowanie ryzyka wystąpienia wad fałdowania.

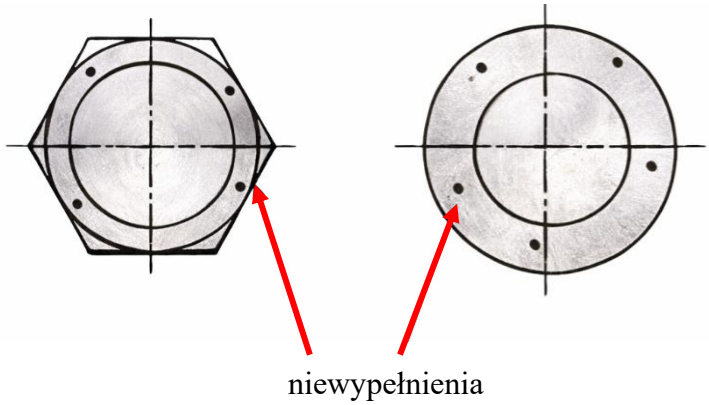
Wady związane z mikrostrukturą pochodzą ze stanu materiału wejściowego i są w dużym stopniu zależne od zmian mikrostruktury podczas procesu kształtowania. Pomimo że powstają na poziomie mikrostruktury, mogą uwidaczniać się zarówno wewnętrznie, jak i zewnętrznie. Wewnętrznie, nieprawidłowości mikrostrukturalne obejmują przede wszystkim odchylenia w składzie fazowym, wymiarach i morfologii od wymaganych standardów lub specyfikacji. Mogą one obejmować grube ziarna, ziarna hybrydowe i niejednorodne mikrostruktury rekrystalizacji. W procesach odkształcania cieplno-mechanicznego, przemiany fazowe mogą prowadzić do defektów, takich jak niewłaściwe naprężenia szczątkowe [34]. Wady strukturalne pochodzą z inherentnych cech materiału, takich jak wtrącenia, granice ziaren i rozkłady faz. Te nieregularności mikrostrukturalne często stają się miejscami inicjacji defektów makroskopowych pod intensywnymi naprężeniami i odkształceniami występującymi podczas procesów formowania metali. Na przykład pustki lub wtrącenia niemetaliczne w odlewanych kęsach mogą działać jako koncentratory naprężeń podczas kucia, prowadząc do pęknięć wewnętrznych, które rozprzestrzeniają się wraz z dalszym odkształcaniem [34].

Rysy i zawalcowania pochodzące od materiału wejściowego uwidaczniają się w procesie kształtowania znacznie częściej niż nieciągłości wynikające z naprężeń kucia. Tego typu rysy są charakterystyczne ze względu na ich przebieg, który jest przeważnie prostą lub łagodnie zakrzywioną liniową nieciągłością przebiegającą wzdłużnie na gwincie, trzpieniu, łbie, lub przez całą długość śruby w przypadku wad ciągłych. Przykłady tego typu wad pokazano na rys. 1.5.10.



Rys. 1.5.10. Przykład rys/pęknięć występujących na śrubach, pochodzących z materiału wejściowego

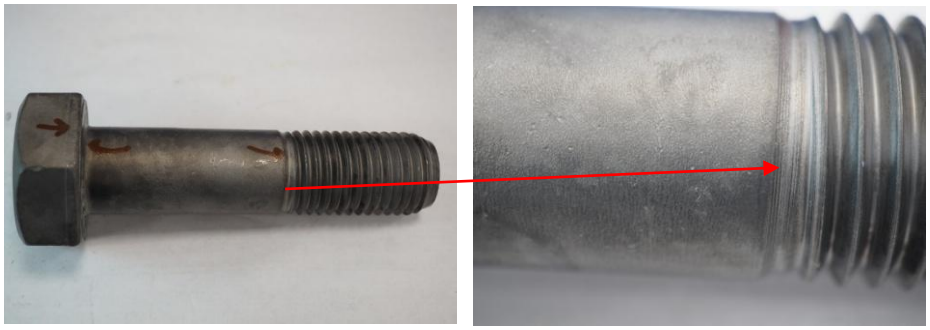
Kolejną wadą wyrobu powstałą na skutek wad występujących w materiale wejściowym są niewypełnienia. Niewypełnienia (rys. 1.5.11) są płytką kieszenią lub wgłębieniem na powierzchni śruby i są efektem niewypełnienia matrycy podczas spęcznia. Do powstania niewypełnienia w śrubie może dojść w momencie, gdy w materiale wejściowym występują odciski spowodowane wiórami lub korozją, które nie zostały zlikwidowane podczas spęcznia.



Rys. 1.5.11. Przykład niewypełnienia na śrubie

W przypadku niewypełnień występujących na powierzchni oporowej, istotnym jest, iż ich łączna powierzchnia nie może przekraczać 5% całkowitej powierzchni oporowej. Jest to bezpośrednio związane z procesem dokręcania i warunkami tarcia występującymi pomiędzy powierzchnią oporową łba śruby a podłożem.

Ostatnim rodzajem nieciągłości powierzchni są ślady po narzędziach (rys. 1.5.12.), są to wzdłużne lub kołowe rowki o małej głębokości, powstałe na skutek ruchu narzędzia obracającego się względem powierzchni śruby.



Rys. 1.5.12. Przykład śladów po narzędziach widocznych na powierzchni śruby

Wszystkie opisane powyżej wady mogą występować w różnych miejscach w obrębie wytwarzanego elementu, przybierać różne formy, pojawiać się na różnych etapach cyklu kształtowania. W obróbce metali, prawie wszystkie dane wejściowe procesu i zmienne w procesie kształtowania, takie jak właściwości materiału, przebieg procesu, parametry procesu, narzędzia, wpływają na występowanie wad. Różne wady mogą mieć wspólne cechy, ale mogą również wykazywać sprzeczne mechanizmy powstawania. Dlatego mechanizm powstawania każdej wady jest unikalny i wysoce złożony, co utrudnia osiągnięcie produkcji bez wad. W rezultacie skuteczna kontrola i zapobieganie defektom stają się coraz pilniejszymi wyzwaniami.

Jak wskazano powyżej, powstawanie defektów w procesie formowania jest rezultatem współdziałania wielu mechanizmów. W konsekwencji defekty te często wykazują cechy charakterystyczne dla różnych kategorii, co prowadzi do ich wzajemnego nakładania się. Mechanizmy powstawania zakuć i pęknięć w cztero- i pięcioetapowym procesie formowania na zimno śrub opisano w [40]. Naprężenie może zmienić sposób płynięcia materiału, co z kolei wpływa na rozkład i morfologię wewnętrznych defektów. Ponadto obecność defektów mikrostrukturalnych wpływa również na rozkład naprężeń i charakterystykę płynięcia materiału. Te wewnętrzne defekty z kolei wpływają na właściwości mechaniczne materiału i zachowanie odkształcenia plastycznego, które następnie przekazuje informacje zwrotne do pola naprężeń i przepływu materiału, tworząc złożoną sieć interakcji [34]. Dlatego też, sklasyfikowane typy defektów oddziałują ze sobą.

Powyżej scharakteryzowane wady można generalnie powiązać z dwoma głównymi przyczynami ich powstawania [34]:

1- przyczynami związanymi z procesem – obejmują one niewłaściwe obciążenie odkształcające, niewłaściwie dobrane parametry procesu (takie jak odkształcenie, prędkość odkształcania i temperatura robocza), czynniki związane z narzędziem matrycowym (w tym warunki tarcia) i wpływy środowiskowe, takie jak warunki chemiczne,
2- przyczynami związanymi z metalurgią – obejmują one obecność niekorzystnych mikrostruktur w materiale wejściowym (np. segregacja pierwiastków i porowatość w strukturze podczas krzepnięcia), zmiany mikrostrukturalne podczas obróbki mechanicznej (takie jak lokalizacja odkształceń i tworzenie się mikropustek) oraz rozwój niepożądanych końcowych mikrostruktur.

Przyczyny związane z procesem wynikają zazwyczaj z wyboru nieodpowiednich procesów odkształcania, a także z późniejszych etapów obróbki końcowej, takich jak obróbka cieplna. Przyczyny związane z metalurgią wynikają z wielu różnych czynników, od początkowej struktury krzepnięcia wlewka do ewolucji strukturalnej podczas procesu odkształcania cieplno-mechanicznego. Wskazane czynniki warunkują generowanie defektów w materiale w toku obróbki plastycznej metalu, znajomość mechanizmów powstawania defektów jest istotnie ważna w celu zapewnienia zgodności wyrobu z wymaganiami norm branżowych oraz rysunku technicznego danego wyrobu.

1.6. Obróbka cieplna

Procesy obróbki cieplnej stali tj. hartowanie i odpuszczanie, obejmują nagrzewanie i chłodzenie metalu, mogą służyć jednak różnym celom i mają unikalny wpływ na materiał.

Hartowanie to proces obróbki cieplnej stosowany w celu zwiększenia twardości i wytrzymałości stali. Polega on na podgrzaniu metalu do określonego zakresu temperatur, a następnie szybkim schłodzeniu, zazwyczaj poprzez hartowanie w wodzie lub oleju. To szybkie schładzanie zapobiega tworzeniu się dużych struktur krystalicznych, co prowadziłoby do uzyskania bardziej miękkiego i ciągliwego metalu. Głównym celem hartowania jest uzyskanie materiału odpornego na zużycie, ścieranie i wgniecenia. Utwardzona stal charakteryzuje się wyższą wytrzymałością na rozciąganie. Pierwszy etap

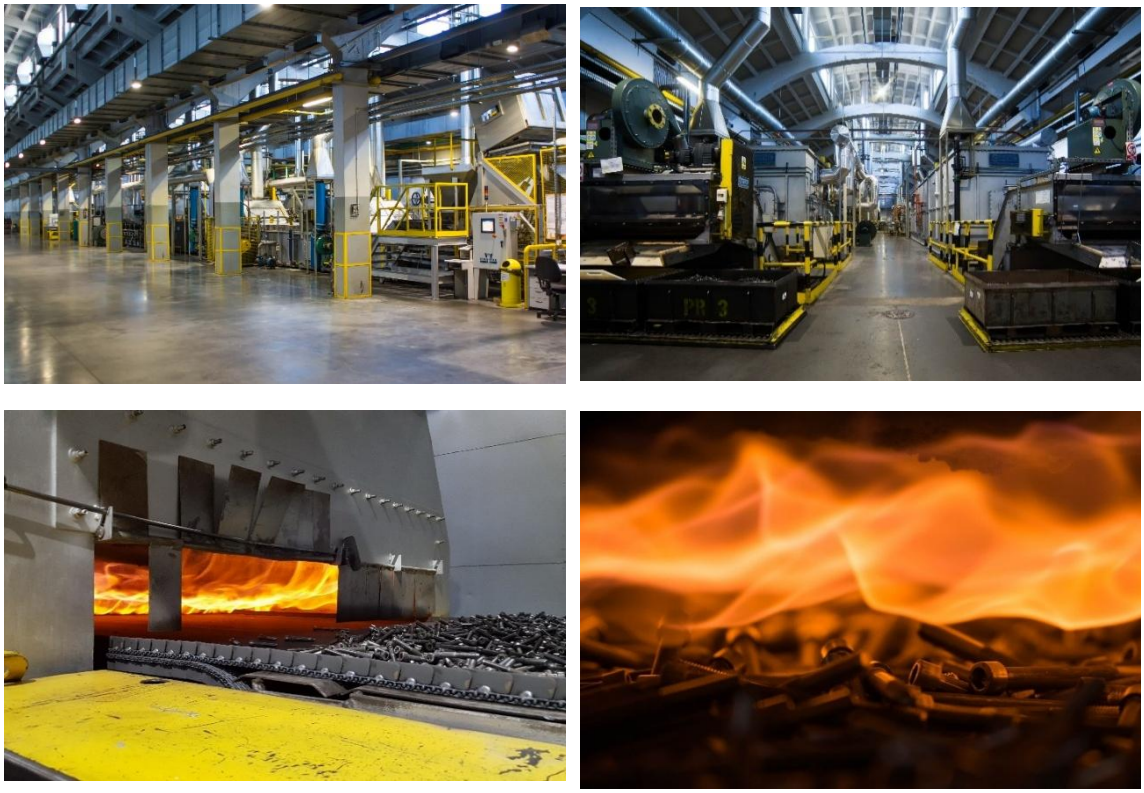
procesu hartowania polega na nagrzaniu stali do określonej temperatury, zwanej temperaturą austenityzacji. Temperatura ta zmienia się w zależności od rodzaju metalu i jego pożądanych właściwości. Nagrzewanie odbywa się w kontrolowanym środowisku, aby zapewnić równomierny rozkład temperatury w całym metalu. Po osiągnięciu temperatury austenityzacji metal jest szybko schładzany do temperatury pokojowej w celu uzyskania pożądanej twardości. Ten proces chłodzenia, znany jako hartowanie, można przeprowadzić przy użyciu różnych mediów, takich jak woda, olej lub powietrze. Wybór medium hartowniczego zależy od składu metalu i pożądanego poziomu twardości. Woda zapewnia szybsze chłodzenie, co skutkuje twardszym metalem, podczas gdy olej zapewnia wolniejsze chłodzenie, co prowadzi do niższej twardości [41].

Odpuszczanie to proces obróbki cieplnej przeprowadzany po hartowaniu w celu uzyskania korzystnych właściwości metalu poprzez zmniejszenie kruchości spowodowanej szybkim chłodzeniem. Polega on na podgrzaniu metalu do określonej temperatury i stopniowym schłodzeniu. W przeciwieństwie do hartowania, odpuszczanie ma na celu zrównoważenie twardości z poprawą wytrzymałości i ciągliwości. Odpuszczanie zapewnia zachowanie niektórych pierwotnych właściwości stali, jednocześnie zyskując dodatkowe, pożądane właściwości użytkowe. Nieznacznie zmniejsza twardość, ale zwiększa plastyczność i odporność metalu na nagłe uderzenia. Ponadto odpuszczanie poprawia skrawalność metalu i zmniejsza ryzyko pęknięć. Pierwszym etapem procesu odpuszczania jest nagrzanie zahartowanego metalu do określonej temperatury, zwanej temperaturą odpuszczania. Dokładna temperatura zależy od rodzaju metalu i pożądanych właściwości mechanicznych. Po nagrzaniu następuje etap wytrzymywania, w którym metal jest utrzymywany w temperaturze odpuszczania przez określony czas. Podczas tego etapu mikrostruktura metalu ulega zmianie, a nadmierna twardość lub kruchość zostaje zredukowana. Czas trwania odpuszczania różni się w zależności od rodzaju stali i pożądanych właściwości użytkowych. Po etapie wytrzymywania metal jest powoli schładzany do temperatury pokojowej, zazwyczaj poprzez chłodzenie powietrzem. Stopniowe chłodzenie pomaga zapobiec odkształceniom strukturalnym, które mogą wystąpić w wyniku gwałtownych zmian temperatury. Efektem końcowym jest odpuszczona stal o zrównoważonej twardości i zwiększonej wytrzymałości [41].

Literatura [42], [43], [44], [45] wskazuje, że kombinacja hartowania i odpuszczania jest skuteczną metodą ulepszania mikrostruktury i właściwości mechanicznych stali, umożliwiając jednoczesne zwiększenie twardości, wytrzymałości

oraz bezpieczeństwa użytkowania wyrobów. Analiza tych procesów stanowi podstawę do projektowania prawidłowych cykli obróbki cieplnej w kontekście praktycznych zastosowań przemysłowych.

Piece do obróbki cieplnej stanowią istotny element infrastruktury technologicznej w procesach hartowania i odpuszczania wyrobów śrubowych, ponieważ zapewniają kontrolowane warunki nagrzewania, wygrzewania oraz chłodzenia materiału. Ich zadaniem jest utrzymanie jednorodnego rozkładu temperatury w całej objętości obrabianych elementów, stabilności parametrów procesu oraz powtarzalności warunków cieplnych, co bezpośrednio przekłada się na uzyskiwaną mikrostrukturę i właściwości mechaniczne wyrobów. W praktyce przemysłowej do obróbki cieplnej stali stosuje się najczęściej piece komorowe oraz piece przelotowe. Piece komorowe wykorzystywane są głównie w procesach jednostkowych i małoseryjnych, gdzie istotna jest elastyczność załadunku i możliwość precyzyjnej regulacji parametrów głównie detali o większych gabarytach. Piece przelotowe (rys. 1.6.1) znajdują zastosowanie w produkcji seryjnej, umożliwiając ciągły transport elementów przez strefy nagrzewania, wygrzewania i chłodzenia, co sprzyja wysokiej wydajności procesu.



Rys. 1.6.1. Układ pieców przelotowych do obróbki cieplnej (górne zdjęcia); śruby na taśmie transportowane do pieca do hartowania (dolne zdjęcia) [1]

W procesie obróbki cieplnej wyrobów śrubowych znaczącą rolę odgrywa kontrola atmosfery pieca, której skład i potencjał węglowy powinny być ściśle nadzorowane. Niewłaściwe warunki prowadzenia procesu mogą bowiem skutkować niepożądanymi zjawiskami dyfuzyjnymi na powierzchni materiału, takimi jak nawęglanie lub odwęglenie.

W przypadku niekontrolowanego nawęglania dochodzi do wzbogacenia warstwy wierzchniej w węgiel, co prowadzi do wzrostu twardości powierzchniowej wyrobów śrubowych. Zjawisko to wpływa bezpośrednio na parametry funkcjonalne śruby, w szczególności na odporność na zużycie. Z kolei odwęglenie powoduje zubożenie warstwy przypowierzchniowej w węgiel, czego konsekwencją jest obniżenie twardości powierzchniowej oraz pogorszenie właściwości wytrzymałościowych. Szczególnie niebezpiecznym przypadkiem jest odwęglenie ferrytyczne, powstające w wyniku nieprawidłowo prowadzonego procesu. Prowadzi ono do wytworzenia warstwy ferrytu, co może inicjować uszkodzenia (np. pęknięcia) wyrobów podczas ich eksploatacji. W przypadku wyrobów śrubowych stosowanych w odpowiedzialnych konstrukcjach, takich jak układy przenoszenia obciążeń w pojazdach samochodowych, wymagania dotyczące dopuszczalnego poziomu odwęglenia powierzchni są szczególnie restrykcyjne i często bardziej rygorystyczne niż standardowe wymagania norm branżowych. Z tego względu proces obróbki cieplnej powinien być prowadzony pod ścisłym nadzorem technologicznym, z kontrolą parametrów atmosfery oraz systematyczną weryfikacją stopnia odwęglenia na gotowych wyrobach. Zapewnienie stabilnych warunków procesu stanowi istotny element gwarantujący powtarzalność właściwości mechanicznych oraz bezpieczeństwo eksploatacyjne wyrobów śrubowych.

1.7. Powłoki ochronne

Na wyjściu procesu obróbki cieplnej otrzymujemy wyroby ciemne pokryte emulsją tymczasowo zabezpieczającą przed korozją, które mogą być poddane dalszej obróbce – obróbce powierzchniowej. Ze względu na warunki pracy jakim poddawane są elementy złączne, wyroby te często pokrywane są powłokami ochronnymi, zabezpieczającymi elementy złączne przed negatywnym wpływem środowiska. W przemyśle stosuje się różnorodne systemy powłok ochronnych w celu zabezpieczenia wyrobów śrubowych przed korozją, a także w celu stabilizacji tarcia podczas procesu montażu. Powłoki te można

podzielić na kilka głównych grup, różniących się zarówno sposobem nanoszenia, jak i właściwościami ochronnymi.

Jednym z najszerzej stosowanym systemem powłok ochronnych są powłoki nanoszone w procesie elektrolizy, takie jak np. cynk elektrolityczny oraz cynk – nikiel elektrolityczny. W tym elektrochemicznym procesie jony metalu lub stopu metali osadzają się na powierzchni podłoża (śruby) w wyniku przepływu prądu elektrycznego przez roztwór elektrolitu zawierający jony osadzanego metalu. Skład chemiczny i struktura powłoki zależą ściśle od parametrów procesu, takich jak gęstość prądu, skład kąpieli elektrolitycznej, temperatura kąpieli. Elektrolityczne powłoki cynkowe oraz cynk–nikiel są szeroko stosowane w zabezpieczeniach antykorozyjnych elementów złącznych, ze względu na możliwość precyzyjnej kontroli grubości warstwy, jednorodność osadzania oraz korzystne właściwości antykorozyjne i tribologiczne (stabilizujące współczynnik tarcia).

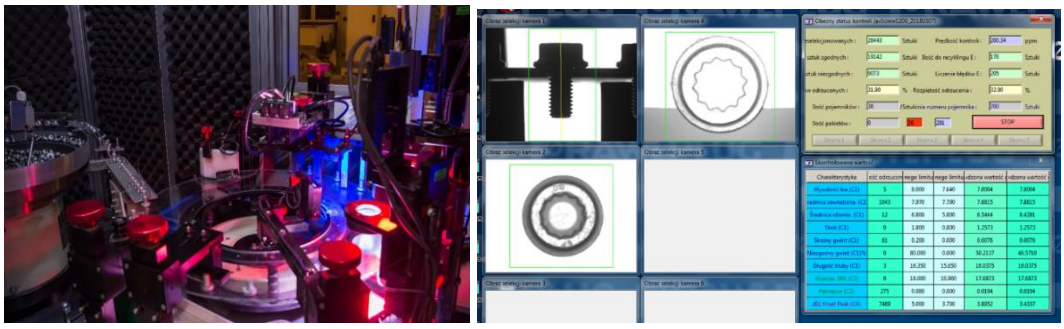
Szeroko stosowane są również powłoki z płatków cynku i aluminium, które opracowano w celu zwiększenia odporności korozyjnej w porównaniu z cynkiem galwanicznym. Powłoki te zawierają głównie płatki cynku, w niektórych przypadkach zmieszane z płatkami aluminium. Kształt płatków pozwalana na uzyskanie na nanoszonej powierzchni gęstej warstwy powłoki z równolegle ułożonymi płatkami, co zwiększa właściwości ochronne powłoki. W zależności od rodzaju powłoki, płatki mogą być powiązane na bazie organicznej bądź nieorganicznej. Powłoki te nanoszone są w procesach malarskich np. typu zanurz – odwiruj (dip – spin).

Zarówno powłoki elektrolityczne jak i powłoki płatków cynku – aluminium są szeroko stosowane w przemyśle motoryzacyjnym. Ich przewagę stanowi możliwość kontrolowania współczynnika tarcia podczas dokręcania (gwarancja stabilnego współczynnika tarcia), dzięki systemowym rozwiązaniom nakładania filmów smarnych typu top – coat na powłoki bazowe (np. cynk elektrolityczny, cynk – nikiel oraz płatki cynku - aluminium). Warstwa smarna powinna generować stabilne i powtarzalne właściwości cierne podczas montażu, gwarantować odporność na poluzowanie i zużycie cierne podczas pracy oraz umożliwiać kontrolowane i wolne od uszkodzeń luzowanie podczas demontażu. Powłoki smarne wywierają ogromny wpływ na właściwości tribologiczne połączeń śrubowych. Warstwa stałego środka smarnego pozwala na uzyskanie najniższych wartości współczynnika tarcia na gwincie oraz na powierzchni oporowej w porównaniu do zastosowania środków smarnych typu oleje czy emulsje.

Dla wyrobów stosowanych w budownictwie i konstrukcjach stalowych preferowaną metodą zabezpieczenia antykorozyjnego jest cynkowanie ogniowe, co jest przede wszystkim związane z wysoką odpornością korozyjną w bardzo wymagających środowiskach pracy. Cynkowanie ogniowe jest procesem metalurgicznym polegającym na nanoszeniu powłoki cynkowej na powierzchnię elementów stalowych poprzez ich zanurzenie w kąpieli ciekłego cynku. Do głównych zalet tej metody należą: stosunkowo znaczna grubość powłoki (zwykle 40–100 µm w zależności od wymagań normowych), co pozwala na długoletnie zabezpieczenie antykorozyjne i wysoką odporność na oddziaływanie środowisk agresywnych. Ograniczeniem procesu jest natomiast mniejsza precyzja kontroli grubości powłoki w porównaniu z metodami elektrolitycznymi, wpływ wysokiej temperatury procesu na właściwości mechaniczne niektórych gatunków stali.

1.8. Selekcja 100%

W produkcji wyrobów śrubowych przeznaczonych dla odbiorców z sektora OEM (Original Equipment Manufacturer) coraz powszechniej stosuje się 100% selekcję optyczną (rys.1.8.1.) jako element końcowej kontroli jakości wyrobu. Proces ten polega na automatycznej inspekcji każdego detalu z wykorzystaniem systemów wizyjnych wysokiej rozdzielczości, umożliwiających kontrolę wymiarów geometrycznych, kształtu, gwintu, obecności wad powierzchniowych oraz niezgodności powłoki ochronnej.



Rys. 1.8.1. Zdjęcia z procesu 100% selekcji optycznej, od lewej: widok w środku maszyny; ustawienie kontrolowanych charakterystyk w oprogramowaniu maszyny

Celem selekcji optycznej jest odseparowanie wyrobów niezgodnych z wymaganiami rysunkowymi oraz specyfikacjami klienta, jeszcze przed wysyłką do odbiorcy. Rozwiązanie to stanowi istotne narzędzie minimalizacji ryzyka jakościowego, co ma szczególne znaczenie w przypadku elementów złącznych przeznaczonych do

zastosowań motoryzacyjnych, gdzie proces dokręcania realizowany jest automatycznie na liniach montażowych, przy minimalnej ingerencji człowieka.

Zastosowanie 100% kontroli umożliwia spełnienie rygorystycznych wymagań jakościowych OEM, w tym utrzymanie poziomu braków na poziomie 10 ppm (parts per million), co oznacza maksymalnie 10 wyrobów niezgodnych na milion dostarczonych sztuk. Osiągnięcie takiego wskaźnika wymaga nie tylko wysokiej skuteczności systemu detekcji, lecz również stabilności procesów produkcyjnych oraz odpowiedniego zarządzania danymi jakościowymi.

2. Elementy złączne wymagające zastosowania matryc segmentowych podczas kucia na kuźniarkach

Kucie wyrobów specjalnych z wykorzystaniem matryc segmentowych stanowi zaawansowaną metodę kształtowania plastycznego, umożliwiającą otrzymywanie odkuwek o złożonej geometrii. Procesy kucia i formowania z użyciem matryc zamkniętych były znane już w XIX wieku, a pierwsze rozwiązania z matrycami dzielonymi zaczęły rozwijać się w latach 90-tych XX wieku. Przykładem jest patent EP0734294B1 z 1993 r [46].

2.1. Śruby dla budownictwa

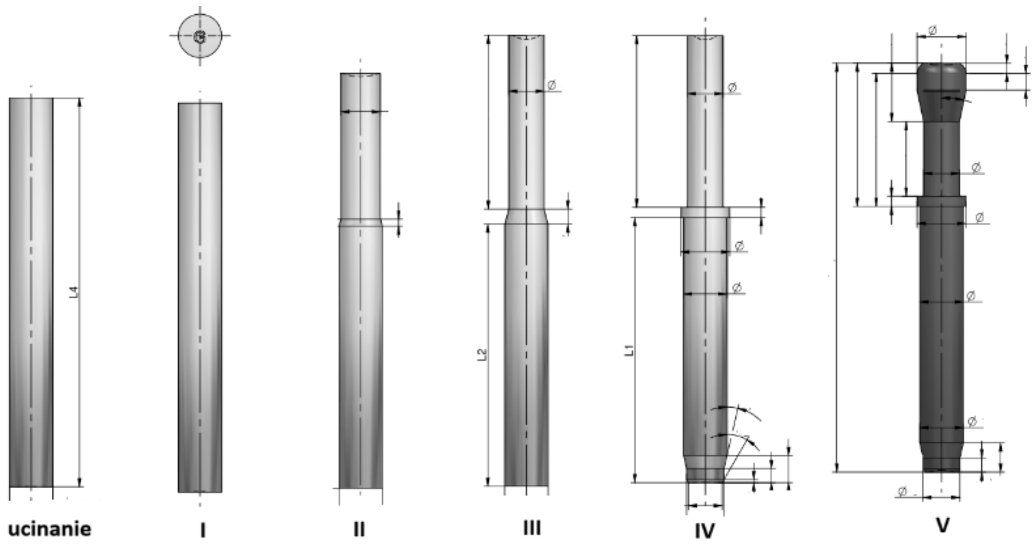
W budownictwie stosowane są różne rodzaje śrub, np. wkręty samogwintujące, wkręty do płyt gipsowo-kartonowych, wkręty do tarasów, wkręty do drewna, wkręty i śruby do betonu oraz wiele innych. Mają one zróżnicowaną konstrukcję i z reguły są wykonane z wytrzymałych materiałów, takich jak stal wysokowęglowa, stal nierdzewna.

Jednym z takich elementów złącznych stosowanych w budownictwie są kotwy do betonu. Są one zaprojektowane tak, aby wytrzymywały siły ścinające znacznie przewyższające te, które oferują tradycyjne śruby, zapewniając solidne połączenia z betonowym podłożem o zwiększonej nośności. Przykładem takiego elementu złącznego przeznaczonego dla budownictwa jest śruba R-XPT III 12x100 mm (średnica łba ϕ12 mm i długość 100 mm), wytwarzana w firmie Koelner Rawlplug IP, której fragment rysunku technicznego przedstawiono na rys. 2.1.1. Jest to kotwa opaskowa, z elektrolityczną powłoką cynkową, przeznaczona do zastosowań w betonie niespękanym. Śruba ta wykonana jest ze stali węglowej C17C (o zawartości 0,14 – 0,20% węgla). W miejscu tradycyjnego kołnierza posiada zredukowaną średnicę na montaż opaski rozporowej. Kucie takich śrub na kuźniarkach wymaga dodatkowej wykańczającej obróbki skrawaniem lub zastosowania matryc segmentowych w celu uformowania łba śruby kotwy.

Proces kucia tego typu śruby kotwy mechanicznej, składa się z pięciu operacji (rys. 2.1.1). Ucinek jest transferowany do operacji pierwszej, która polega na wykonaniu cechowania oraz fazowania górnej części wsadu, w wyniku których formowany jest plastyczny czubek materiału. Zabieg ten stanowi etap przygotowawczy do procesu redukcji

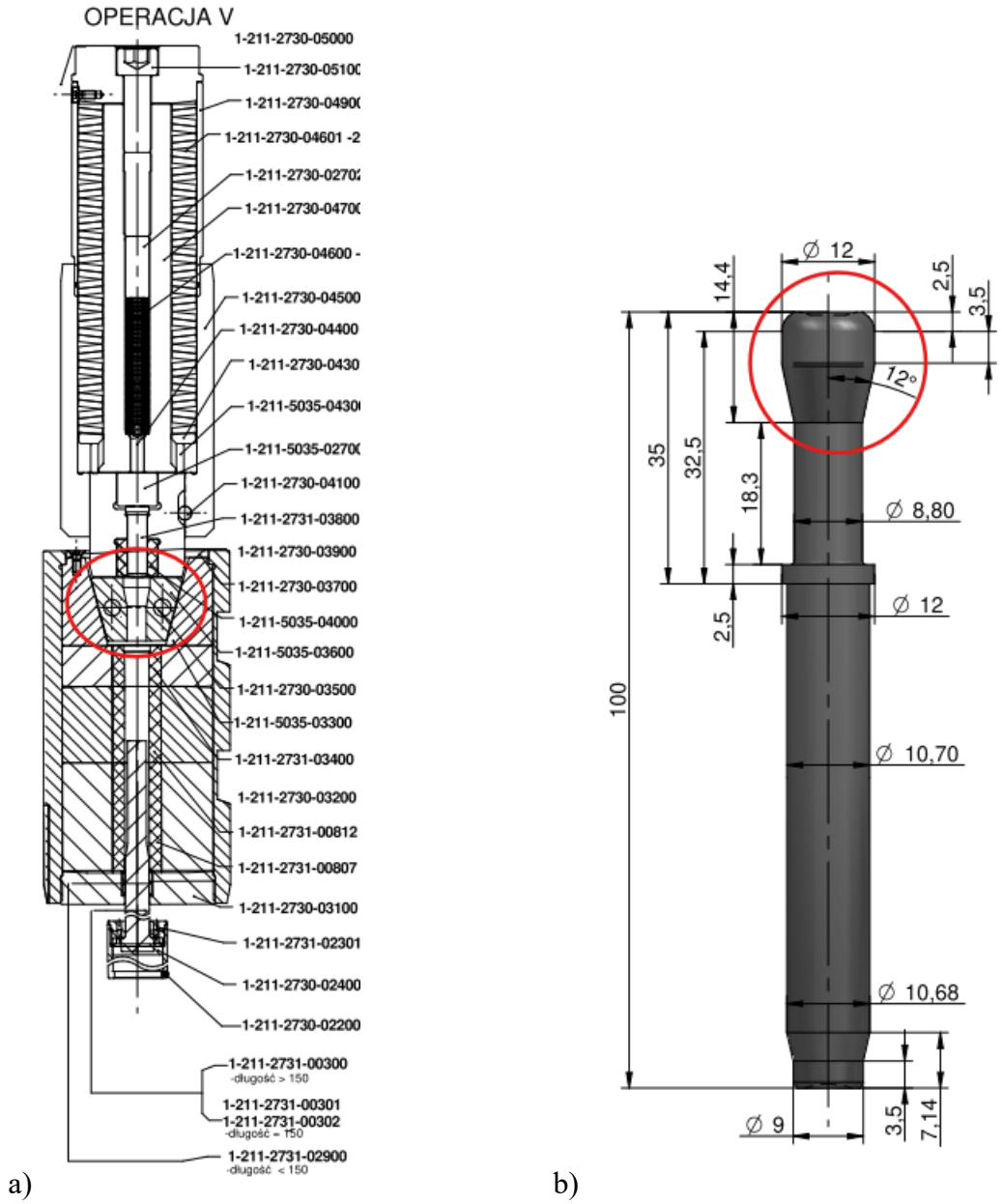
średnicy realizowanego w kolejnej operacji. Odpowiednio ukształtowana geometria końca wsadu eliminuje negatywny wpływ zadziorów powstających podczas odcinania ucinka materiału, ograniczając niekorzystne zjawiska tribologiczne występujące w kontakcie materiał–narzędzie. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie stabilniejszych warunków płynięcia materiału przez matrycę redukcyjną, zmniejszenie obciążeń narzędzi oraz redukcja ryzyka ich przyspieszonego zużycia lub zatarcia.

Następnie w operacji drugiej oraz trzeciej realizowane jest przewężenie pod szyjkę, na którą w etapie finalnego montażu nakładana jest opaska rozporowa. W operacji czwartej następuje formowanie małego kołnierza śruby w matrycy zamkniętej na skutek spęczania jak również plastyczne kształtowanie czubka śruby. W operacji ostatniej (piątej) następuje kształtowanie łba śruby z wykorzystaniem matrycy segmentowej oraz finalne ukształtowanie czubka śruby.

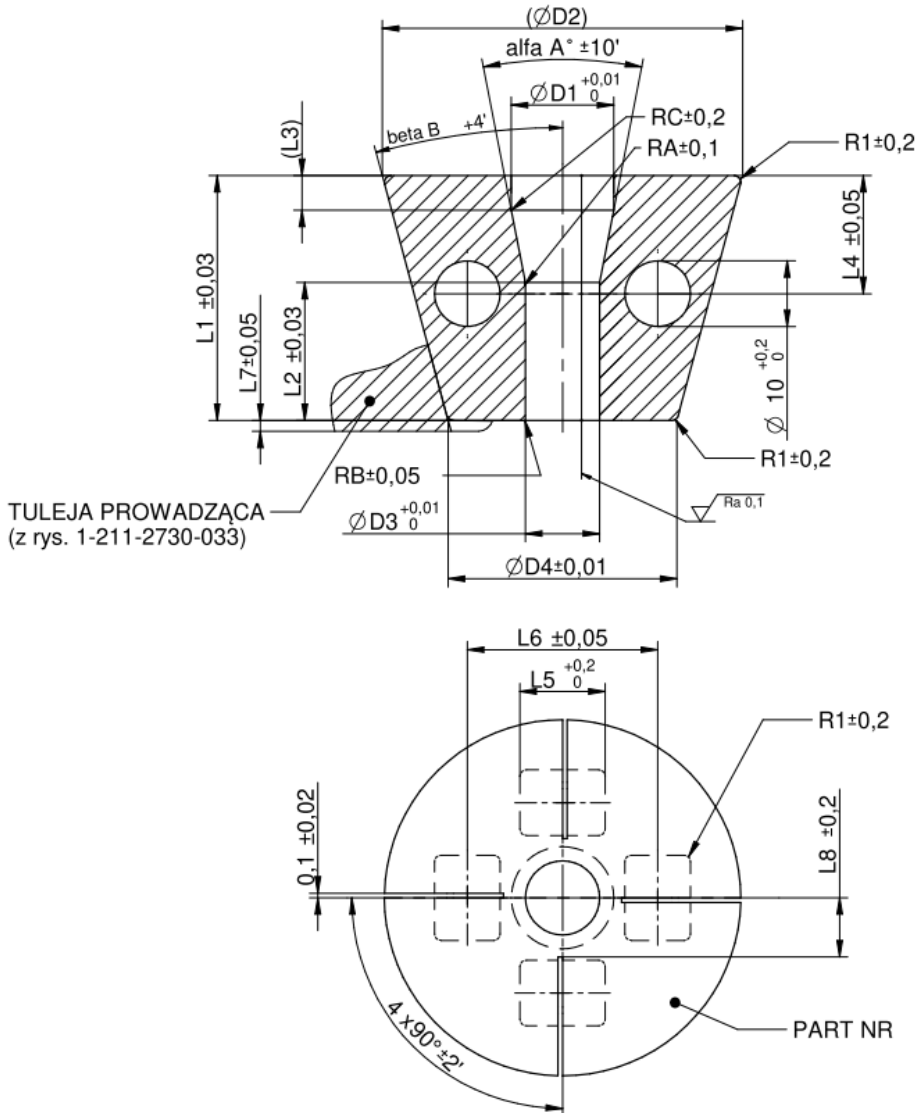


Rys. 2.1.1. Układ spęczek śruby kotwy R-XPT III [1]

W początkowej fazie operacji V segmenty matrycy pozostają w pozycji otwartej. Ruch roboczy suwaka powoduje przemieszczenie zespołu nagłownika (rys. 2.1.2), złożonego z obudowy, wkładki spiekanej i kołka, które inicjuje proces zamykania segmentów matrycy (rys. 2.1.3.). Domykanie następuje wskutek współpracy segmentów ze stożkową powierzchnią obudowy matrycy oraz nacisku wywieranego przez elementy nagłownika. Po całkowitym zamknięciu segmentów dalszy ruch kołka nagłownika powoduje oddziaływanie na półfabrykat, prowadząc do jego spęczania. W warunkach ograniczonej przestrzeni odkształcenia materiał płynie wewnątrz zamkniętej matrycy segmentowej, wypełniając jej gniazdo zgodnie z przyjętą geometrią wyrobu.



Rys. 2.1.2. a) Fragment technologii kucia wyrobu R-XPT III – operacja V, na której formowany jest łeb przy zastosowaniu matryc segmentowych zaznaczonych na rysunku; b) wyrób R-XPT III z zaznaczonym miejscem formowania matrycą segmentową [1]



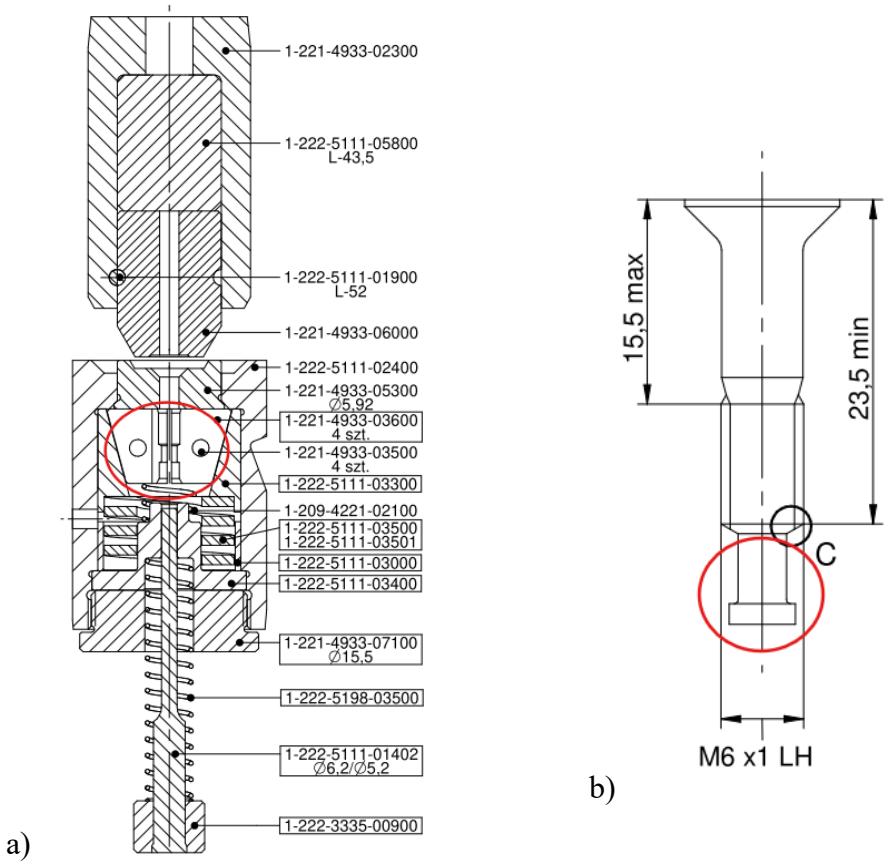
Rys. 2.1.3. Matryca segmentowa stosowana w produkcji wyrobu R- XPT III [1]

2.2. Śruby dla motoryzacji

Elementy złączne stosowane w przemyśle samochodowym cechują się nierzadko złożoną i niestandardową geometrią, determinowaną specyfiką konstrukcyjną podzespołów, w których znajdują zastosowanie.

Śruba z łbem stożkowym i gniazdem sześciokarbowym przedstawiona na rys. 2.2.1. to element mocujący mający zastosowanie w silnikach Audi EA888, jest jednym z przykładów śrub dla motoryzacji. Ze względu na swoje zastosowanie, podobnie jak inne śruby mocujące wały, śruby w sprzęgle czy koła pasowe, jest ona wykonywana z gwintem lewoskrętnym, aby zapobiec poluzowaniu pod wpływem momentu obrotowego. Wytwarzana jest z stali niskowęglowej 30MnB4, o zawartości węgla 0,27 - 0,34% oraz

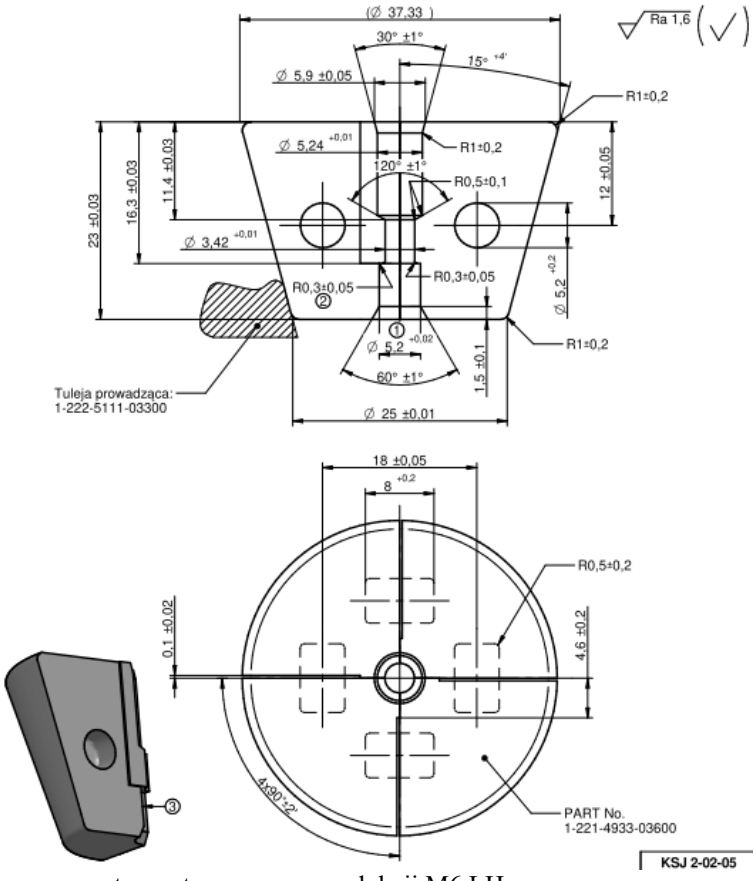
z dodatkiem boru. Ze względu na nietypową geometrię zakończenia, pierwotny proces wytwarzania obejmował kombinację kucia i obróbki skrawaniem w celu uzyskania wymaganego kształtu i wymiarów końcowych. Proces skrawania następował po etapie obróbki cieplnej, następującej po procesie kucia połączonym z bezpośrednim walcowaniem gwintu. W pierwotnej technologii proces skrawania ograniczał wydajność produkcji wyrobu gotowego do zaledwie 200 sztuk na zmianę. Po wprowadzeniu modyfikacji technologicznej, polegającej na zastosowaniu matrycy segmentowej w procesie kucia, możliwe stało się wyeliminowanie obróbki skrawaniem. Finalna wydajność produkcji wyrobu gotowego wzrosła do 50 000 sztuk na zmianę.



Rys. 2.2.1. a) Fragment technologii kucia wyrobu M6x29,5 LH – operacja V, na której formowane jest zakończenie śruby przy zastosowaniu matryc segmentowych zaznaczonych na rysunku;
b) wyrób M6x29,5 LH z zaznaczonym miejscem formowania matrycą segmentową [1]

Proces kucia na zimno z wykorzystaniem matrycy segmentowej, składa się z pięciu operacji. W operacji pierwszej i drugiej ucinek jest przewężany na średnicę pod zakończenie śruby. W operacji trzeciej następuje wstępne spęczenie łba oraz sworznia. Natomiast w operacji czwartej formowany jest finalny kształt stożka na łbie oraz

wewnętrznego gniazda sześciokarbowego. W ostatniej operacji kształtowane jest zakończenie śruby, za pomocą matrycy segmentowej, pokazanej na rys. 2.2.2.



Rys. 2.2.2. Matryca segmentowa stosowana w produkcji M6 LH

Zakończenie śruby jest formowane z wykorzystaniem czterosegmentowej matrycy (rys. 2.2.2). Pod działaniem siły osiowej stempla segmenty przemieszczają się po stożkowych powierzchniach prowadzących, zamykając wnękę roboczą wokół końca śruby. W wyniku odkształcenia plastycznego materiał przepływa promieniowo, wypełniając przestrzeń roboczą matrycy i formując kołnierz o wymaganej geometrii. Po zakończeniu operacji segmenty zostają rozsunięte przez mechanizm powrotny, co umożliwia wyjęcie odkuwki pomimo występowania podcięcia oraz średnicy kołnierza większej od średnicy trzpienia. Zastosowanie matrycy segmentowej umożliwia wykonanie elementu o złożonej geometrii przy zachowaniu ciągłości włókien materiału, co, jak wspomniano w wcześniejszym rozdziale, korzystnie wpływa na właściwości mechaniczne gotowej śruby.

3. Krytyczna analiza technologii kształtowania wyrobów śrubowych o złożonej geometrii

3.1. Technologie wytwarzania elementów śrubowych

Produkcja elementów złącznych, takich jak śruby czy wkręty, stanowi istotny dział przemysłu metalowego. W większości przypadków od wyrobów tych wymagana jest wysoka wytrzymałość, dokładność i powtarzalność wymiarowa, co ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji czy elementów, w których są stosowane. Najbardziej znanym i powszechnie stosowanym procesem produkcji śrub jest kucie na zimno, ponieważ zapewnia najlepszy kompromis pomiędzy wydajnością, jakością i kosztem produkcji.

Dominującą technologią kucia różnorodnych elementów złącznych jest kucie na kuźniarkach. Kuźniarki są maszynami kuźniczymi, które w jednym cyklu maszynowym wykonują kilka operacji spęczania dając w efekcie gotowy wyrób. W przypadku śrub o zło-żonej geometrii łba, proces kucia jest często uzupełniany dodatkowymi operacjami obróbki skrawaniem. Takie rozwiązanie pozwala osiągnąć wysoką dokładność wymiarową i kształtową, niedostępną dla technologii kucia matrycami litymi, zwłaszcza w przypadku detali wymagających wąskich tolerancji wymiarowych czy złożonych kształtów geometrycznych. Wprowadzenie takich dodatkowych operacji technologicznych (tj. obróbki skrawaniem) prowadzi do wzrostu kosztów jednostkowych produkcji, wydłużenia czasu cyklu oraz zwiększonego zużycia narzędzi, a to może ograniczać konkurencyjność ekonomiczną wyrobu. Rozwój procesu produkcyjnego wymaga więc uwzględnienia kompromisu między wymaganiami jakościowymi a kosztami wytwarzania, a także analizy wpływu sekwencji operacji i parametrów technologicznych na efektywność całego procesu.

3.2. Matryce segmentowe w procesach kucia wyrobów śrubowych

Rozwój przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego i budowlanego zmusza wytwórców do opracowywania nowych technologii, narzędzi oraz dostosowywania maszyn przetwórczych. Jednym z bardziej rokujących rozwiązań, podejmowanych przez

wytwórców wyrobów śrubowych jest poszukiwanie nowych, złożonych konstrukcji matryc i ich adaptacja na aktualnie stosowanych urządzeniach (kuźniarkach).

Matryce segmentowe stosowane w kuźnictwie są narzędziami składającymi się z kilku oddzielnych elementów (segmentów), które po zamontowaniu w obudowie tworzą kompletną matrycę. Są one stosowane w procesach kucia matrycowego zamkniętego oraz w kuciu na kuźniarkach. Charakteryzują się wyższą trwałością, ponieważ segmenty często wykonuje się z węglika wolframu lub specjalnych stali narzędziowych, co zapewnia wysoką odporność na ścieranie i naciski. Segmentowa konstrukcja tych matryc pozwala na dokładniejsze wykonanie gniazda matrycy i tym samym dokładniejsze odwzorowanie kształtu odkuwki niż jest to możliwe za pomocą matryc jednolitych. W przypadku uszkodzenia ich regeneracja jest łatwiejsza, ponieważ wymienia się tylko uszkodzony segment, a nie całą matrycę. Matryce składane, o konstrukcji segmentowej, stosowane są przy kuciu precyzyjnych odkuwek, o wysokiej wytrzymałości.

Przy kuciu odkuwek, które mają wklęsło-wypukłą powierzchnię boczną stosuje się ruchome matryce segmentowe. Matryce takie, po plastycznym uformowaniu odkuwki, wysuwają się z oprawy narzędziowej i rozchylają, dzięki czemu jest możliwe usuwanie odkuwki z gniazda matrycy. Zastosowanie tych matryc umożliwia otrzymywanie zarysu wklęsło-wypukłego wyrobu, niemożliwego do odwzorowania za pomocą narzędzi litych. Jednocześnie prawidłowe odwzorowanie złożonych kształtów odkuwek wymaga zastosowania wysokich nacisków powierzchniowych, które w przypadku stosowania ruchomych matryc segmentowych mogą stanowić czynnik ograniczający ich efektywność i trwałość.

3.3. Wytwarzanie śrub o złożonej geometrii

Elementy złączne stosowane w przemyśle samochodowym cechują się nierzadko złożoną i niestandardową geometrią, determinowaną specyfiką konstrukcyjną podzespołów, w których znajdują zastosowanie. Wraz z rozwojem konstrukcji pojazdów obserwuje się systematyczny wzrost stopnia skomplikowania kształtów wyrobów śrubowych, w szczególności w zakresie geometrii łbów oraz stref przejściowych. Złożoność ta wynika z rosnących wymagań dotyczących wytrzymałości, redukcji masy oraz doskonalenia przestrzeni montażowej.

W literaturze przedmiotu szeroko omawiane są zagadnienia ogólne związane z kształtowaniem plastycznym wyrobów śrubowych, analizą naprężeń w procesach kucia na zimno czy trwałością narzędzi. Zdecydowanie rzadziej podejmowane są jednak szczegółowe analizy dotyczące wytwarzania śrub o niestandardowej, złożonej geometrii, wymagającej modyfikacji klasycznych zestawów narzędziowych. Na podstawie analizy dostępnych publikacji można zauważyć, iż brakuje w szczególności kompleksowych opracowań łączących analizę konstrukcji matryc segmentowych z oceną efektywności technologicznej.

Ponadto dostępne publikacje koncentrują się głównie na aspektach materiałowych lub wytrzymałościowych gotowego wyrobu, natomiast w ograniczonym stopniu analizują zagadnienia doskonalenia procesu wytwarzania w warunkach produkcji wielkoseryjnej.

3.4. Identyfikacja luki badawczej i uzasadnienie podjęcia badań

Ze względu na duże zapotrzebowanie przemysłu motoryzacyjnego i budowlanego na wyroby śrubowe o złożonej, nietypowej geometrii istnieje uzasadniona potrzeba zastosowania matryc segmentowych do ich wytwarzania. Wymaga to jednak opracowania nowych konstrukcji narzędzi, modernizacji (korekty) istniejących procedur wytwórczych na kuźniarkach (zmiany sekwencji operacji spęczania) oraz realizacji testów technologicznych pozwalających na adaptację zmian w procesach wielkoseryjnych.

Przedsiębiorstwa produkcyjne w dużej mierze opierają się na doświadczeniu i praktycznej wiedzy pracowników, zdobywanej przez wieloletnią pracę oraz specjalistyczne szkolenia. W warunkach przemysłowych przygotowanie narzędzi i wykonanie prób technologicznych jest często szybsze niż opracowanie i walidacja zaawansowanych modeli numerycznych. Ponadto w przypadku szczególnie złożonych geometrii modele komputerowe nie zawsze odzwierciedlają w pełni rzeczywiste warunki procesu.

W konsekwencji można wskazać lukę badawczą dotyczącą systemowego podejścia do projektowania i wdrażania złożonych narzędzi kuźniczych, w szczególności matryc segmentowych, umożliwiających eliminację operacji wtórnych, zwłaszcza obróbki

skrawaniem, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej jakości wyrobów oraz efektywności procesu produkcyjnego.

Zidentyfikowana luka badawcza uzasadnia potrzebę prowadzenia badań nad opracowaniem i wdrożeniem nowych konstrukcji matryc, w tym rozwiązań segmentowych, oraz oceną ich wpływu na parametry technologiczne, ekonomiczne i jakościowe procesu wytwarzania wyrobów śrubowych o złożonej geometrii.

W związku z dynamicznym rozwojem przemysłu, związanym z modyfikacją geometrii wyrobów śrubowych oraz koniecznością wytwarzania coraz bardziej złożonych kształtów, poszukiwanie nowych konstrukcji matryc i ich adaptacja do obecnie eksploatowanych kuźniarek stanowi kierunek badań o istotnym znaczeniu naukowym i aplikacyjnym.

4. Określenie celu i zakresu badań

Głównym celem pracy była analiza plastycznego kształtowania wklęsło-wypukłej powierzchni bocznej łba śruby łącznika stabilizatora (ŚŁS) za pomocą matrycy segmentowej w procesie kucia na kuźniarce. Zastosowanie ruchomej matrycy segmentowej w tym procesie wymagało dogłębnej analizy sposobu odkształcania w kolejnych operacjach spęczania. Kolejność operacji spęczania, w czasie których następuje formowanie wypukłości kołnierza górnego i dolnego na łbie wyrobu gwintowego (np. najpierw wykonywany jest górny kołnierz, później dolny lub odwrotnie) i osadzenie matrycy segmentowej w różnych gniazdach bloku matrycowego kuźniarki zmienia przebieg i sposób odkształcenia plastycznego spęczanego materiału (i tym samym realizacji operacji kształtowania łba).

Utylitarnym celem badań było opracowanie kompletnej technologii wytwarzania śruby łącznika stabilizatora o nietypowym wklęsło – wypukłym kształcie łba za pomocą kucia na zimno na kuźniarce. Zastosowanie kucia na kuźniarce wymagało uwzględnienia kompromisu między wymaganiami jakościowymi a kosztami wytwarzania, a także analizy wpływu sekwencji operacji i parametrów technologicznych na efektywność całego procesu. Założono, że zastosowanie matryc segmentowych podczas plastycznego kształtowania wyrobów śrubowych umożliwia otrzymywanie zarysu wklęsło-wypukłego wyrobu, niemożliwego do odwzorowania za pomocą narzędzi litych w procesie kucia. Zakładano, że prawidłowe odwzorowanie złożonych kształtów śrub będzie wymagało zastosowania wysokich nacisków powierzchniowych, które w przypadku zastosowania matryc segmentowych są niepożądane.

Zakres badań obejmował przegląd literatury w obszarze wykonywania gwintowanych elementów złącznych, opracowanie prób technologicznych z wykorzystaniem matrycy segmentowej (konstrukcja narzędzi i sekwencja ich montażu w gniazdach roboczych kuźniarki) z uwzględnieniem symulacji metodą elementów skończonych oraz technologiczne testy wytwarzania na wydziale produkcyjnym.

Przegląd literatury w zakresie tematyki pracy uzasadnia zastosowania matryc segmentowych do kształtowania łbów wyrobów śrubowych o złożonej, nietypowej geometrii.

W oparciu o przegląd literatury i analizę stanu zagadnienia sformułowano następującą tezę pracy:

Produkcja gwintowanych elementów złącznych o skomplikowanej geometrii łba może być realizowana w procesie kucia z wykorzystaniem matryc segmentowych. Zastosowanie matryc segmentowych pozwoli na kształtowanie pofałdowanej (wklęsło – wypukłej) powierzchni bocznej łba śruby. Dodatkowym efektem ich zastosowania jest bardziej korzystna struktura włóknista, która przekłada się na zwiększoną wytrzymałość wyrobu. Stosowanie matryc segmentowych jest trudne ze względu na rozwiązania konstrukcyjne współczesnych kuźniarek, ale jest możliwe.

5. Plan badań

Badania podzielono na trzy etapy: projektowania sekwencji spęczania i konstrukcji narzędzi, prób technologicznych i analizy uzyskanych wyników oraz zaprojektowania finalnej technologii produkcyjnej wyrobu gotowego.

W ramach pierwszego etapu zaprojektowano i wykonano dwa zestawy narzędzi, przeznaczonych do formowania łba łącznika stabilizatora dwiema różnymi sekwencjami spęczania. Podstawą do projektowania narzędzi był rysunek wyrobu gotowego śruby łącznika stabilizatora (ŚŁS). Kształt i wymiary powierzchni roboczych ruchomych elementów matrycy uzależnione były od przyjętej kolejności operacji spęczania, prognozowanej siły spęczania i wymiarów gniazd osadczych w bloku matrycowym kuźniarek. Projektowanie opracowywanych rozwiązań technologicznych wsparto analizą numeryczną opartą na metodzie elementów skończonych (MES), realizowaną z wykorzystaniem oprogramowania QForm 10.1.7, umożliwiającego symulację przebiegu procesu kształtowania plastycznego.

Etap prób technologicznych obejmował kucie na kuźniarce ŚŁS wykonanymi narzędziami, badania metrologiczne kształtu i wymiarów łbów, badania metalograficzne linii płynięcia materiału śruby, badania zakuć, badania wytrzymałościowe. Na tym etapie testowano również nastawy kuźniarki powodujące najlepsze odwzorowanie założonego kształtu wyrobu.

W ostatnim etapie podjęto próbę opracowania kompletnej technologii wytwarzania wyrobu gotowego, uwzględniającego sekwencję kroków produkcyjnych oraz wymagania dla poszczególnych procesów produkcyjnych. Prowadzone próby technologiczne miały na celu opracowanie metody wytwarzania śruby łącznika stabilizatora.

II Część eksperymentalna

6. Metodyka i wyniki badań

Metodyka badań określa systematyczną sekwencję etapów badawczych oraz precyzuje parametry poddawane analizie w poszczególnych fazach procesu. W kontekście niniejszej pracy, której celem jest ocena i optymalizacja zastosowania matryc segmentowych w kształtowaniu łbów wyrobów śrubowych na kuźniarkach, przyjęto kilkuetapowe podejście badawcze, co zostało zaprezentowane na rys. 6.1.

Pierwszy etap obejmował wytwarzanie prototypów wyrobów metodą obróbki skrawaniem, co umożliwiło wykonanie śrub w przypadku nisko wolumenowych zapotrzebowań. Drugi etap polegał na zastosowaniu matryc segmentowych w dwóch wariantach konstrukcyjnych narzędzi oraz z uwzględnieniem różnych kształtów spęczek, co pozwoliło na analizę wpływu konstrukcji narzędzia i geometrii półwyrobów na jakość kształtowania łbów. Trzeci etap badań koncentrował się na doskonaleniu wydajności procesu, obejmującej zwiększenie trwałości eksploatacyjnej tulejki operacji IV. Etap czwarty obejmował wprowadzenie dodatkowego walcowania krytycznego promienia na łbie wyrobu, co pozwoliło na poprawę jakości powierzchni oraz zapewnienie bezpieczeństwa użytkowego.

Przyjęty układ etapów badawczych umożliwił kompleksową ocenę procesu technologicznego oraz identyfikację czynników decydujących o efektywności i jakości wytwarzanych wyrobów. Dodatkowe wsparcie etapu projektowania narzędzi poprzez wykonanie symulacji MES umożliwiło skrócenie czasu koniecznego do zaprojektowania prawidłowego zestawu narzędziowego oraz predykcji wad.

Wybór odpowiednich metod badawczych miał na celu ocenę skuteczności analizowanych rozwiązań technologicznych, z uwzględnieniem wpływu geometrii matryc segmentowych na jakość uzyskiwanych wyrobów, bezpieczeństwo ich użytkowania oraz wydajność procesu produkcyjnego.

W niniejszej pracy przyjęto podejście oparte na badaniach eksperymentalnych dla całego realizowanego procesu badawczego. Zastosowanie tego podejścia umożliwiło weryfikację efektywności stosowania matryc segmentowych, uwzględniając ich zróżnicowane kształty, a także wpływ modyfikacji geometrii spęczek i zmian w kolejności realizowanych operacji na jakość geometryczną i powierzchniową wytwarzanych

elementów. Ponadto, metody eksperymentalne zapewniły możliwość oceny efektywności procesu w kontekście kosztów wytwarzania oraz praktycznej wykonalności wdrożenia opracowanego rozwiązania w warunkach przemysłowych, co umożliwiło sformułowanie rekomendacji zarówno o charakterze naukowym, jak i użytkowym.

Tak sformułowana metodyka badawcza umożliwiła nie tylko weryfikację teoretycznych założeń konstrukcyjnych, ale także ocenę praktycznej przydatności opracowanych rozwiązań w warunkach przemysłowych, co stanowiło podstawę do wdrożenia i rozwoju procesu oraz formułowania rekomendacji dla produkcji seryjnej.



Rys. 6.1. Metodyka badań

W celu oceny wpływu zastosowania matryc segmentowych na jakość i wydajność procesu kształtowania łbów wyrobów śrubowych przyjęto następujące procedury badawcze:

a. Wytwarzanie prototypów wyrobów metodą skrawania

- potwierdzenie możliwości uzyskania wyrobu finalnego spełniającego kryteria użytkowe
- realizacja zapotrzebowań na małą skalę
- określenie wydajności procesu
- określenie kosztu jednostkowego

b. Badania z użyciem matryc segmentowych

- zastosowano dwa warianty konstrukcyjne matryc segmentowych, różniące się geometrią oraz sposobem zamocowania segmentów.
- oba warianty różniły się kształtem spęczki poprzedzającej operację IV, w której stosowano matrycę segmentową

c. Optymalizacja procesu technologicznego

- Przeprowadzono badania wpływu dodatkowego walcowania krytycznego promienia na łbie wyrobu na jakość powierzchni
- Analizowano trwałość eksploatacyjną tulejki operacji IV poprzez pomiar ilości sztuk wyprodukowanych na jednej sztuce tulejki
- Wyniki pozwoliły określić optymalną konstrukcję matrycy segmentowej, parametry narzędzia minimalizujące zużycie tulejek oraz parametry szczęki do walcowania promienia

d. Metody pomiarowe i kryteria oceny

- Badanie składu chemicznego walcówki realizowano za pomocą spektrometru Foundry Master Xpert
- Wymiarowanie łbów wyrobów wykonywano za pomocą przyrządów precyzyjnych, takich jak profilometr, mikrometr, suwmiarka cyfrowa
- Analizę jakości powierzchni prowadzono metodą obrazową oraz przy użyciu projektora Mitutoyo
- Analizę układu włókien wykonano za pomocą mikroskopu NEOPFO-30
- Badanie wytrzymałości na rozciąganie realizowano za pomocą LabTestZD40
- Badanie twardości wykonano za pomocą twardościomierza QNESS 60 A+
- Ocenę struktury realizowano za pomocą mikroskopu NEOPFO-30
- Analizę wad i nieciągłości powierzchni wykonano za pomocą mikroskopu NEOPFO-30
- Ocenę odporności na korozję realizowano przy zastosowaniu komory solnej zdolnej do wykonania badania zgodnie z normą ISO 9227 [47].
- Analizę zgodności wymiarowej wyrobów, oparto na porównaniu wyników pomiarów z wymaganiami geometrycznymi określonymi w rysunku technicznym, w celu oceny spełnienia kryteriów jakościowych
- Ocenę jakości powierzchni oraz wad powierzchni dokonano w oparciu o metodę kontroli zgodnej z normą ISO 6157-3 [33].

6.1. Charakterystyka funkcjonalna śruby łącznika stabilizatora

Łącznik stabilizatora to część, która łączy zewnętrzne końce stabilizatora z elementem zawieszenia (rys. 6.1.1). Układ stabilizacji zawieszenia składa się z kilku elementów, takich jak na przykład łączniki lub tulejki stabilizatora. Drążek stabilizatora jest najczęściej przymocowany do ramy pomocniczej przy pomocy gumowych tulejek. Łączniki stabilizatora mocują go do kolumn zawieszenia, ewentualnie do wahaczy. Specjalne przeguby kuliste łączników stabilizatora zapewniają wymaganą swobodę ruchów i pozwalają na płynną pracę drążka stabilizatora.



Rys. 6.1.1. Budowa łącznika stabilizatora [26]

Łącznik stabilizatora odpowiedzialny jest za utrzymywanie stabilności pojazdu podczas pokonywania zakrętów oraz jazdy po nierównościach. Rola łącznika stabilizatora ujawnia się w sposób szczególny zwłaszcza podczas pokonywania zakrętu. W takim przypadku łącznik zamontowany przy kole wewnętrznym, poruszającym się po mniejszym promieniu, zdejmuje z niego część obciążenia, wynikającego z działania siły odśrodkowej. Następnie za pomocą drążka przekazuje je na drugą stronę. Tam kolejny stabilizator dociąża koło prowadzone po zewnętrznej krawędzi zakrętu. To sprawia, że różnice nacisku na nawierzchnię w ramach jednej osi są niwelowane. W efekcie auto ma lepszą trakcję, podczas pokonywania łuku ponieważ niwelowane jest ryzyko wystąpienia efektu podsterowności przy większej prędkości. Ważne są również elementy gumowe łącznika. Ich zadaniem jest tłumienie drgań [48].

Stabilizator montowany jest w samochodach osobowych od wielu lat, a jego konstrukcja ulega doskonaleniu wraz z wdrażaniem nowych modeli samochodów. Element ten ma ogromny wpływ na bezpieczeństwo podczas jazdy. Zużycie łącznika stabilizatora jest naturalną konsekwencją eksploatacji. W przypadku zużycia lub uszkodzenia elementów stabilizatora, podczas pokonywania nierówności drogi, słyszalne są wyraźne stuki z okolic zawieszenia.

Do najczęstszych przyczyn zużycia łącznika stabilizatora należą [49]:

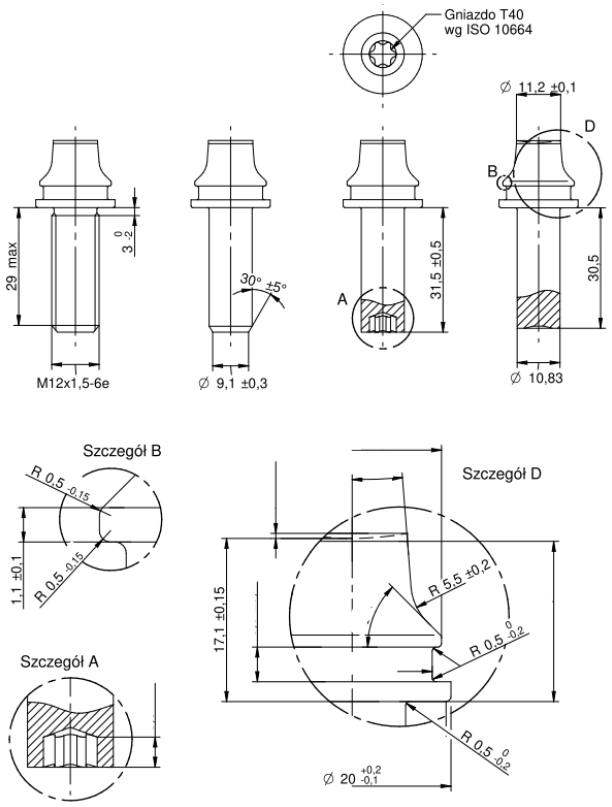
- zużycie - dziesiątki tysięcy kilometrów jazdy podczas której, elementy łącznika znajdują się w ciągłym ruchu, nieuchronnie się zużywając. Nadmierne zużycie powoduje powstanie luzów w gniazdach łącznika. W łączniku stabilizatora, występują przeguby kuliste chronione gumową osłonką przed wodą i działaniem czynników zewnętrznych. Wnętrze gniazda przegubu wypełnione jest smarem ograniczającym tarcie. Często jednakże dochodzi do uszkodzenia osłonki gumowej lub utraty szczelności. Pozwala to na przedostawanie się wody, która przyspiesza zużycie. W rezultacie, na przegubie kulistym pojawia się spory luz, który jest źródłem wspomnianych hałasów. Pękanie uszczelki może nastąpić na skutek:
  - wad geometrycznych śruby łącznika stabilizatora jak np. ostre krawędzie.
  - uszkodzenia drogi - jazda po nierównych nawierzchniach lub progach zwalniających, lub uderzenie w krawężnik lub inny obiekt na drodze może naprężyć łącznik stabilizatora. Możliwe jest, że kula oddzieli się od łba śruby na skutek mocnego uderzenia, pręt pęknie lub spaw ulegnie uszkodzeniu.
  - przeciążenie - wypełnienie pojazdu większą ilością ładunku niż jest on w stanie przewozić lub holowanie przyczepy, która przekracza dopuszczalną ładowność pojazdu, powoduje nadmierne obciążenie łączników stabilizatora. Zwłaszcza podczas pokonywania zakrętów większy ciężar przenosi się na koło zewnętrzne, a łącznik stabilizatora powinien wytrzymać nadmierne obciążenie. Łączniki stabilizatora mogą się rozdzielić, wygiąć lub pęknąć.
  - korozja - łączniki stabilizatora są stale narażone na trudne warunki i materiały drogowe, mogą z czasem rdzewieć lub korodować. Korozja osłabia wytrzymałość konstrukcji, co sprzyja uszkodzeniom lub pęknięciom. Dlatego elementy złączne pełniące rolę przegubów kulistych pokrywane są powłokami ochronnymi takimi jak np. elektrolityczna powłoka Zn – Ni.

W publikacjach naukowych pojawia się również zagadnienie optymalizacji drążka stabilizatora, np. Sankar i in. [50] zaproponowali wprowadzenie sprężyny do obudowy przegubu kulowego oraz zmianę materiału, z którego wykonany jest łącznik drążka stabilizatora. Analizę stanu naprężeń i odkształceń drążka stabilizatora w warunkach statycznych przedstawili Cofaru i in. [51]; należy przy tym zaznaczyć, że stabilizator przedniego zawieszenia stanowi standardowe wyposażenie wielu pojazdów, a w części konstrukcji stosowany jest również stabilizator tylnego zawieszenia [52].

Śruba łącznika stabilizatora pojazdu samochodowego, ze względu na specyficzne przeznaczenie, charakteryzuje się nietypową geometrią łba, obejmującą złożony układ powierzchni wklęsłych i wypukłych, połączonych promieniami przejścia o ściśle określonych wartościach geometrycznych. Zachowanie wymaganych wymiarów tych promieni jest kluczowe dla zapewnienia prawidłowej pracy śruby w zawieszeniu samochodu

6.2. Analiza możliwości kształtowania plastycznego śruby łącznika stabilizatora na kuźniarce

Ze względu na skomplikowaną geometrię wyrobu przedstawioną na rys. 6.2.1., podczas procesu kucia będą występowały złożone stany naprężeń i odkształceń wpływające na sposób płynięcia materiału. W konsekwencji istnieje ryzyko powstania odchyłek wymiarowych względem wymagań konstrukcyjnych określonych na rysunku technicznym śruby.



Rys. 6.2.1. Rysunek techniczny śruby łącznika stabilizatora

Na podstawie geometrii śruby i dotychczasowych doświadczeń produkcyjnych zauważono, że największe trudności podczas kucia mogą wystąpić w strefie przejścia między łbem i górnym oraz dolnym kołnierzem. W obszarach tych materiał zmienia kierunek płynięcia, a niewielkie promienie przejściowe utrudniają prawidłowe wypełnienie wykroju. Istotnym wymaganiem jest również zachowanie wysokości łba w założonym polu tolerancji.

Na podstawie powyższej analizy, do oceny poprawności procesu kucia zastosowano symulacje MES rozkładu naprężeń, odkształceń oraz temperatury, co umożliwiło weryfikację poprawności doboru technologii przed wykonaniem oprzyrządowania.

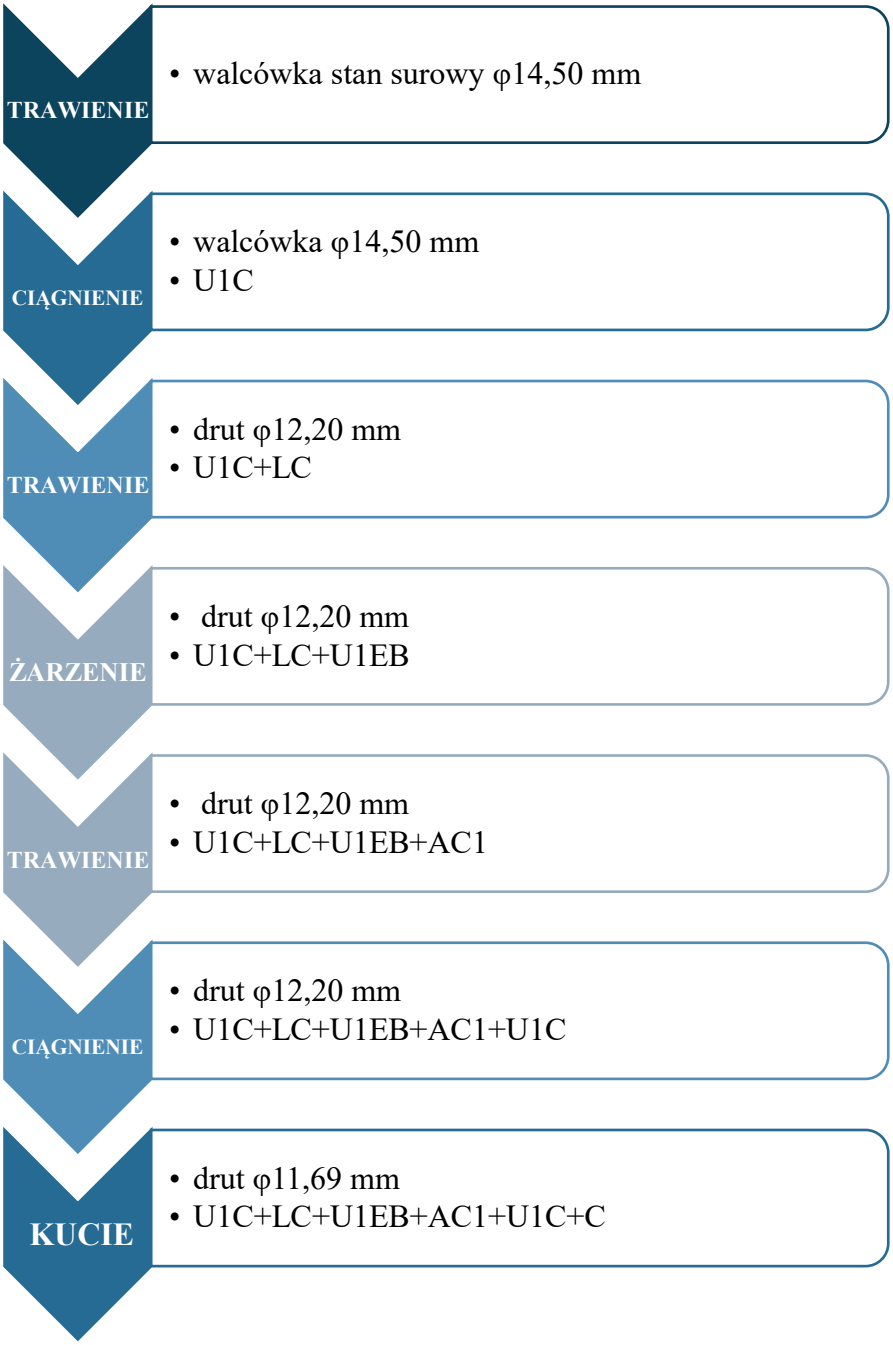
6.3. Wstępne próby technologiczne

Ze względu na złożoną geometrię łba śruby proces przygotowania materiału do końcowego kształtowania jest wieloetapowy i wymagał właściwego doboru parametrów technologicznych na każdym etapie wstępnego formowania. Odpowiedni dobór kolejności procesów przygotowawczych oraz ich parametrów, miał istotny wpływ na prawidłowy przebieg płynięcia materiału oraz uzyskanie odkuwki o wymaganym kształcie i tolerancjach wymiarowych. Jako materiał śruby łącznika stabilizatora zastosowano stal 23MnB4 (EN 1.5535), której skład chemiczny pokazano w tabeli 6.3.1.

Tabela 6.3.1. Skład chemiczny (% mas.) stali 23MnB4 zgodnie z EN 10263-4:2017 [53]

C	Mn	Cr	B	Si	P	S	Al	Ti
0.23	0.97	0.27	0.003	0.1	0.01	0.006	0.027	0.048

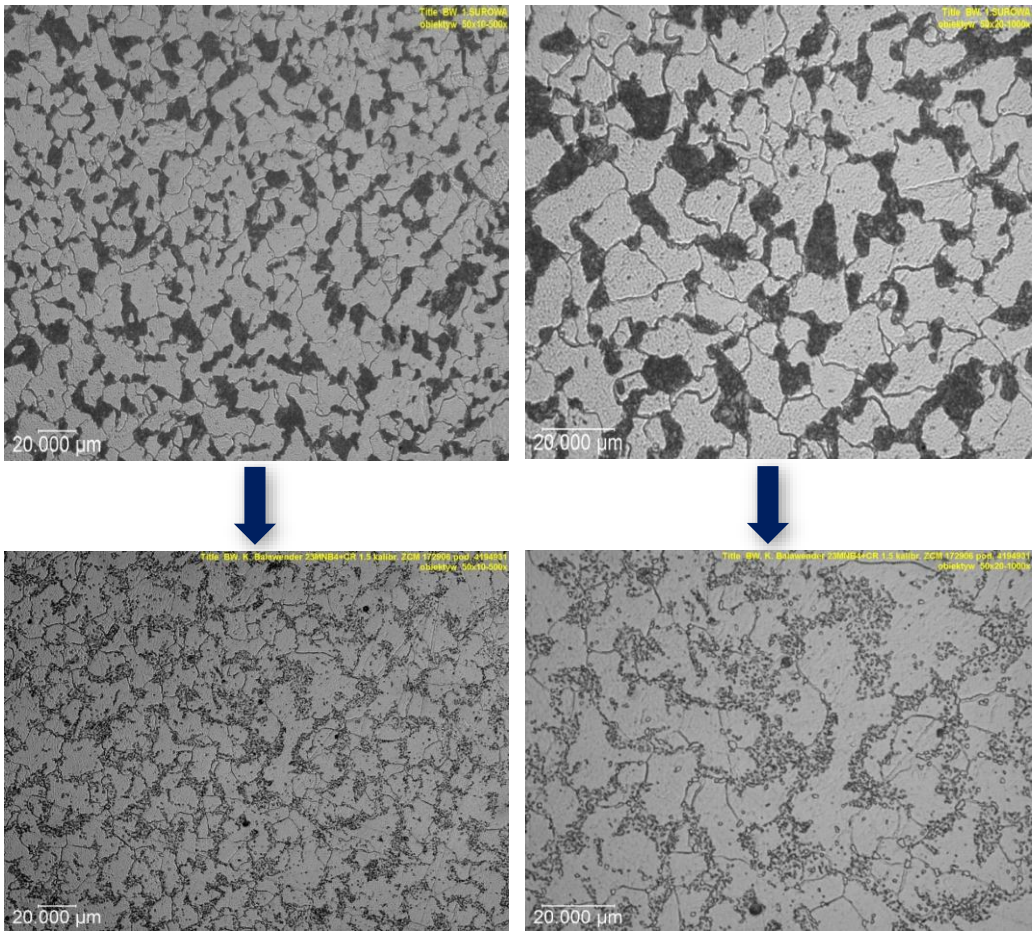
Materiał zastosowany do prób technologicznych został poddany operacjom przygotowawczym, zgodnie z technologią zaprezentowaną na rys. 6.3.1. Proces przygotowania materiału obejmował sekwencję następujących operacji technologicznych: trawienie, ciągnienie, ponowne trawienie, żarzenie, kolejne trawienie, ciągnienie.



Rys. 6.3.1 . Kolejność operacji procesu przygotowania materiału wejściowego do kucia ŚLS gdzie oznaczenia stanu materiału opisane są następująco: U1C – trawienie; LC – ciągnienie (kalibrowanie); U1EB – trawienie przed żarzeniem; AC1 – żarzenie; C – ciągnienie;

Podczas procesu żarzenia materiał był wygrzewany w temperaturze 730^0C przez okres 4,5 godz. następnie po wyłączeniu palników następowało schłodzenie materiału jest do temperatury 680^0C i przebywanie materiału w tej temperaturze przez 4 godz. Po tym etapie następowała zmiana kołpaka grzewczego na kołpak chłodzący i materiał wytrzymywany był pod kołpakiem chłodzącym przez okres 6 godz [54]. Zmiany struktury zachodzące na

skutek procesu wyżarzania sferoidyzującego, dla analizowanego przypadku materiału 23MnB4 zostały przedstawione na rys. 6.3.2. Struktura ferrytyczno - perlityczna materiału surowego przedstawiona na górnych zdjęciach rys. 6.3.2., na skutek przemian zachodzących w materiale w czasie procesu żarzenia, przemieniła się w strukturę o osnowie ferrytycznej z wydzieleniami węglików w postaci sferoidytu (koncentracja węglików przy granicach ziarn), widoczne pogrubione granice ziarn są cementytem III rzędowym, co obrazują dolne zdjęcia na rys. 6.3.2.

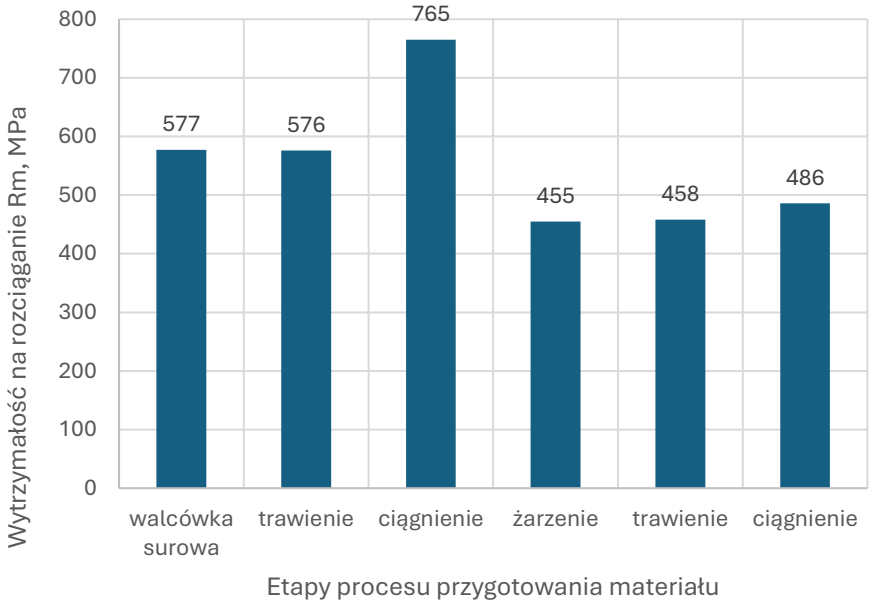


Rys. 6.3.2. Struktura materiału 23MnB4 w stanie surowym (górne zdjęcia) oraz w stanie żarzonym (dolne zdjęcia).

Na skutek procesu ciągnienia, z materiału wejściowego o średnicy równej 14,50 mm uzyskano materiał gotowy do procesu kucia o średnicy końcowej 11,69 mm. Proces ciągnienia zrealizowano dwuetapowo w celu ograniczenia jednostkowego odkształcenia plastycznego oraz kontroli stanu naprężeń w materiale. Pierwszy etap, obejmujący redukcję średnicy z 14,50 mm do 12,20 mm, spowodował istotne umocnienie odkształceniowe i wzrost naprężeń wewnętrznych, na skutek znacznego odkształcenia plastycznego (gniot

z=29%). Zastosowanie drugiego etapu ciągnienia, z 12,2 mm do 11,69 mm, pozwoliło na rozłożenie całkowitej redukcji przekroju na mniejsze przyrosty odkształcenia (gniot z=8%). Takie rozwiązanie ograniczyło ryzyko powstawania pęknięć, nadmiernego nagrzewania materiału oraz pogorszenia jakości powierzchni. Dwuetapowy proces sprzyjał również uzyskaniu lepszej dokładności wymiarowej oraz większej jednorodności struktury materiału przed kolejnymi operacjami technologicznymi.

Na skutek odkształceń plastycznych zachodzących podczas realizowanych operacji technologicznych następowała zmiana właściwości wytrzymałościowych drutu. Procesy ciągnienia prowadziły do umocnienia odkształceniowego materiału, co skutkowało wzrostem jego wytrzymałości, przy jednoczesnym obniżeniu plastyczności. Natomiast proces żarzenia spowodował spadek wytrzymałości na rozciąganie na skutek zmian strukturalnych związanych z sferoidyzacją węglików. Zmianę wytrzymałości na rozciąganie w poszczególnych etapach technologicznych przedstawiono na rys. 6.3.3.

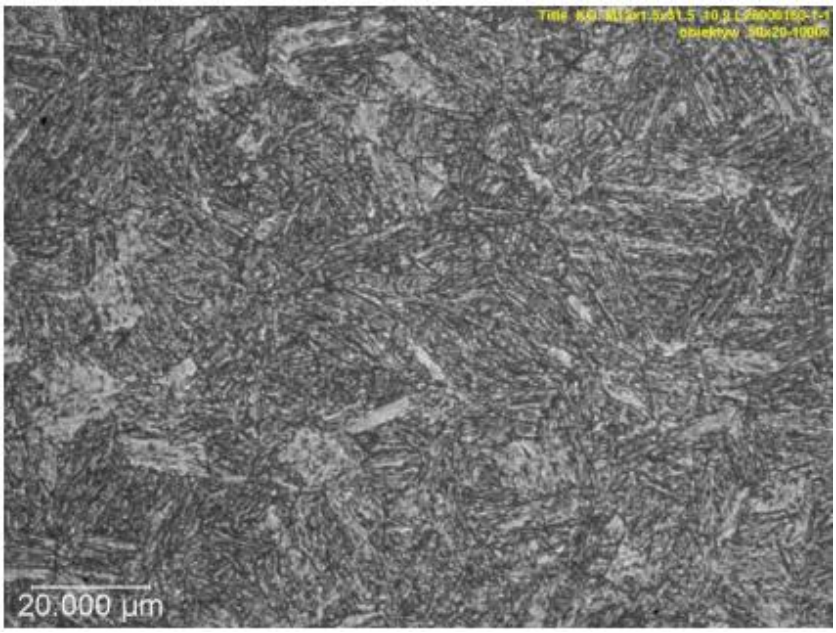


Rys. 6.3.3. Wytrzymałość na rozciąganie po poszczególnych etapach procesu przygotowania materiału 23MnB4

Po zakończeniu procesów przygotowawczych realizowano próby technologiczne kucia wyrobu gotowego, w trakcie których następowało dalsze umocnienie odkształceniowe materiału. Należy jednak podkreślić, że docelowe właściwości mechaniczne wyrobu były determinowane przez zastosowaną obróbkę cieplną, obejmującą hartowanie i odpuszczanie.

Po procesie plastycznego kształtowania testowaną śrubę poddawano obróbce cieplnej, której parametry zostały dobrane w taki sposób, aby spełnić wymagania normy ISO 898-1 [55] dla klasy wytrzymałościowej 10.9 zgodnie z tabelą 3 normy ISO 898-1.

Zastosowanie hartowania i odpuszczania stali 23MnB4 umożliwiło uzyskanie wysokiej twardości powierzchniowej przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej udarności, co jest szczególnie istotne w produkcji wyrobów narażonych na duże obciążenia dynamiczne i zmęczeniowe. Mikrostruktura gwintu uzyskana po hartowaniu i odpuszczaniu stanowiła głównie martenzyt odpuszczony, z niewielką ilością resztkowego ferrytu i węglików (rys. 6.3.4.), co zapewnia dobrą kombinację wytrzymałości, twardości i odporności na pękanie.



Rys. 6.3.4. Struktura testowej ŚŁS po procesie hartowania i odpuszczania

Parametry procesu hartowania i odpuszczania zastosowane do testów obróbki cieplnej podano w tabeli 6.3.2., natomiast wyniki parametrów kontrolnych po procesie obróbki cieplnej partii testowej przedstawione zostały w tabeli 6.3.3.

Tabela 6.3.2. Parametry obróbki cieplnej testowej ŚŁS

	Hartowanie	Odpuszczanie
Temperatura	880^0 C	440^0 C
Min. czas przejścia przez piec	60 min	75 min
Potencjał węglowy	0,23 %	
Wydajność	1700 kg/godz	

Tabela 6.3.3. Wyniki kontroli parametrów testowej ŚŁS po procesie obróbki cieplnej

	Wymaganie dla klasy 10.9 wg ISO 898-1	Uzyskane wyniki
Wytrzymałość na rozciąganie, Rm	min 1040 MPa	1068÷1079 MPa
Twardość HRC	32÷39 HRC	33÷34 HRC

Na podstawie przedstawionych powyżej wyników można stwierdzić, że śruba uzyskała prawidłowe właściwości wytrzymałościowe zgodne z wymaganiami dla klasy 10.9.

6.4. Analiza numeryczna procesu plastycznego kształtowania śruby łącznika stabilizatora na kuźniarce

Po zakończeniu wstępnych prób technologicznych wykonano analizy numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). Badania miały na celu ocenę oraz weryfikację poprawności przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych zestawu narzędzi przed ich wykonaniem i wykorzystaniem w badaniach eksperymentalnych. W ramach przeprowadzonych analiz wyznaczono rozkłady temperatury wsadu, naprężeń efektywnych (effective stress), naprężeń średnich (mean stress) oraz odkształcenia plastycznego (plastic strain).

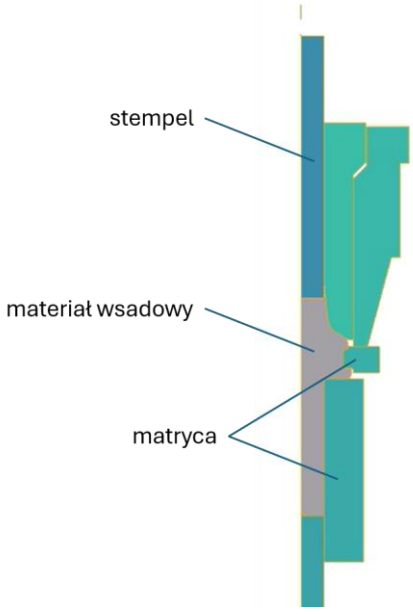
6.4.1. Charakterystyka modelu numerycznego

Analizą MES objęto cztery pierwsze operacje kucia, podczas których kształtowany jest łeb śruby. Piątą operację pominięto, ponieważ służy ona wyłącznie wykonaniu gniazda w zakończeniu śruby i nie była istotna z punktu widzenia zakresu przeprowadzonych badań.

W analizie zastosowano trójwymiarowy model procesu. Narzędzia modelowano jako ciała sztywne, natomiast materiał wsadu jako ciało odkształcalne plastycznie. Charakterystyka materiałowa została pobrana z bazy danych programu QForm 10.1.7, przyjęto jednorodny model materiałowy.

6.4.2. Model geometryczny

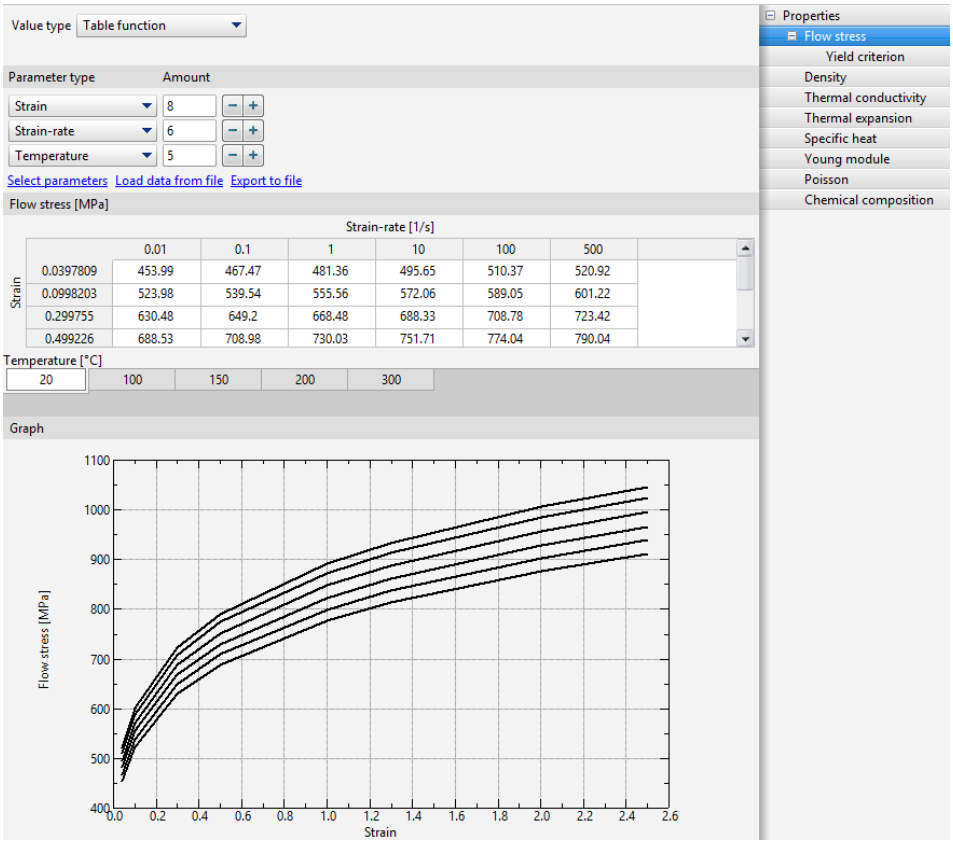
Geometria narzędzi została odwzorowana na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej. W skład modelu (rys. 6.4.2.1.) wchodziły stempel, matryca oraz półwyrób poddawany kolejnym operacjom kucia. Ze względu na osiowosymetryczny charakter procesu przyjęto uproszczony model osiowosymetryczny, umożliwiający skrócenie czasu obliczeń przy zachowaniu odpowiedniej dokładności wyników.



Rys. 6.4.2.1. Model geometryczny wykorzystany w analizie MES

6.4.3. Warunki brzegowe i model materiałowy

W obliczeniach numerycznych wykorzystano stal 19MnB4 (średnica wsadu 10,50 mm, długość wsadu 49 mm), stanowiącej odpowiednik stali 23MnB4 stosowanej w rzeczywistym procesie produkcyjnym. Zastosowanie tego gatunku stali wynikało z dostępności charakterystyk materiałowych w bazie danych programu QForm 10.1.7. Ze względu na zbliżony skład chemiczny oraz właściwości mechaniczne obu gatunków stali przyjęto, że materiał 19MnB4 w sposób wystarczająco dokładny odwzorowuje zachowanie stali 23MnB4 podczas procesu kucia na zimno, istotne różnice mogą ujawnić się w obróbce cieplnej. Na rysunku rys. 6.4.3.1. przedstawiono krzywe umocnienia materiału 19MnB4 dostępne w bazie materiałów programu QForm 10.1.7.



Rys. 6.4.3.1. Krzywe płynięcia materiału przyjęte do analizy numerycznej, dostępne w bazie materiałów programu QForm 10.1.7

Na powierzchni kontaktu materiał–narzędzie przyjęto model tarcia Coulomba, a współczynnik tarcia założono na poziomie 0,3. Początkowa temperatura wsadu została

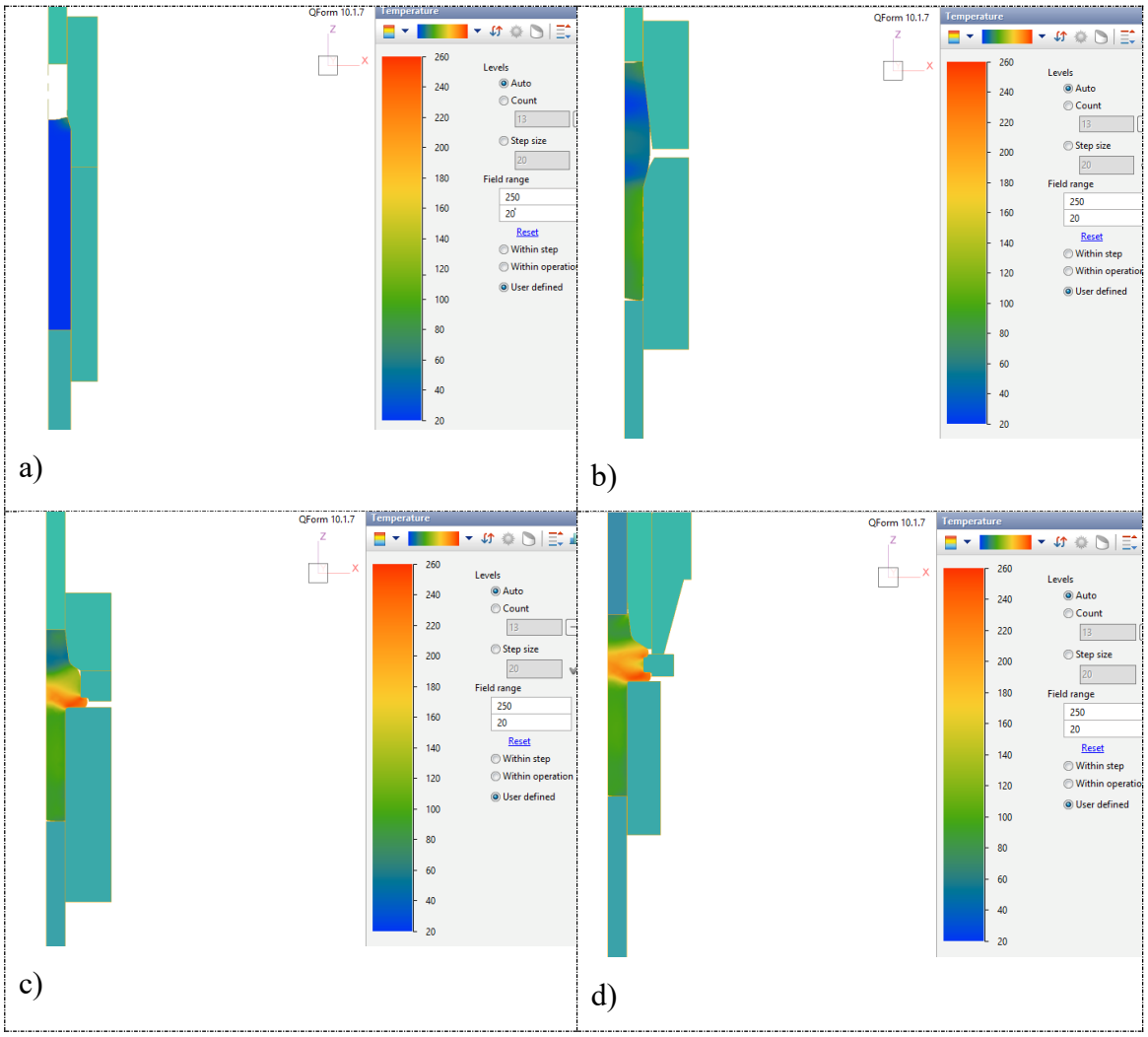
określona na 20°C, co odpowiada warunkom kucia na zimno. Prędkość roboczą procesu przyjęto na poziomie 80 szt./min, zgodnie z parametrami stosowanymi w warunkach przemysłowych. Stopień gniotu obliczono na podstawie zmian pola przekroju poprzecznego materiału, odpowiadających redukcji średnicy z 10,50 mm do 8,81 mm. Maksymalny stopień gniotu osiągnął wartość 29,3%. Właściwości sprężyste materiału opisano za pomocą modułu Younga E = 210 GPa oraz współczynnika Poissona ν = 0,3.

W analizie wykorzystano adaptacyjną siatkę elementów skończonych. W obszarach o złożonej geometrii oraz w strefach kontaktu materiału z narzędziami stosowano większe zagęszczenie elementów, natomiast w pozostałych częściach modelu siatka była rzadsza. W trakcie obliczeń wykorzystywano automatyczne przeliczanie siatki (remeshing), co umożliwiało zachowanie jej odpowiedniej jakości przy dużych odkształceniach materiału. Maksymalną liczbę kroków obliczeniowych pomiędzy kolejnymi operacjami remeshingu ustalono na 20. Adaptację siatki prowadzono automatycznie, bez definiowania stałego rozmiaru elementów. Minimalny poziom adaptacji przyjęto równy 1, maksymalny 15, natomiast współczynnik adaptacji wynosił 1. Dodatkowo zastosowano współczynnik przyspieszenia adaptacji o wartości 1,5, co poprawiało odwzorowanie geometrii oraz rozkładów analizowanych wielkości.

Na rysunku 6.4.3.2. przedstawiono rozkład temperatury materiału podczas kolejnych operacji kucia. Początkowo wsad (rys.6.4.3.2 a) charakteryzuje się jednakową temperaturą w całej objętości materiału (około 20^0C). Gradient temperatury występuje w strefie przewężania, w miejscu styku materiału z narzędziem (wzrost do około 100^0C) . W kolejnych etapach (rys.6.4.3.2b, c) widoczny jest dalszy wzrost temperatury w obszarze kontaktu wsadu z narzędziem, jest on związany z koncentracją odkształceń plastycznych oraz tarcia na powierzchni kontaktu. Intensywny wzrost temperatury następuje w obszarze formowania dolnego kołnierza łba (około 220^0C- 240^0C). Jednocześnie poza strefą kształtowania temperatura pozostaje znacznie niższa (około 100^0C). Ostatni etap procesu (rys.6.4.3.2d) przedstawia operację formowania górnego kołnierza w matrycy segmentowej. W obszarze formowanego dolnego kołnierza obserwuje się wzrost temperatury (około 240^0C- 260^0C), który prowadzi do obniżenia naprężenia uplastyczniającego materiału. W rezultacie zmniejszają się opory plastycznego płynięcia, co ułatwia wypełnienie wykroju i prawidłowe ukształtowanie kołnierza.

Rozkład temperatury jest silnie skorelowany z przebiegiem odkształcenia plastycznego. Maksymalne wartości temperatury występują w obszarach największej

intensywności przepływu materiału, gdzie energia odkształcenia jest efektywnie zamieniana na ciepło.

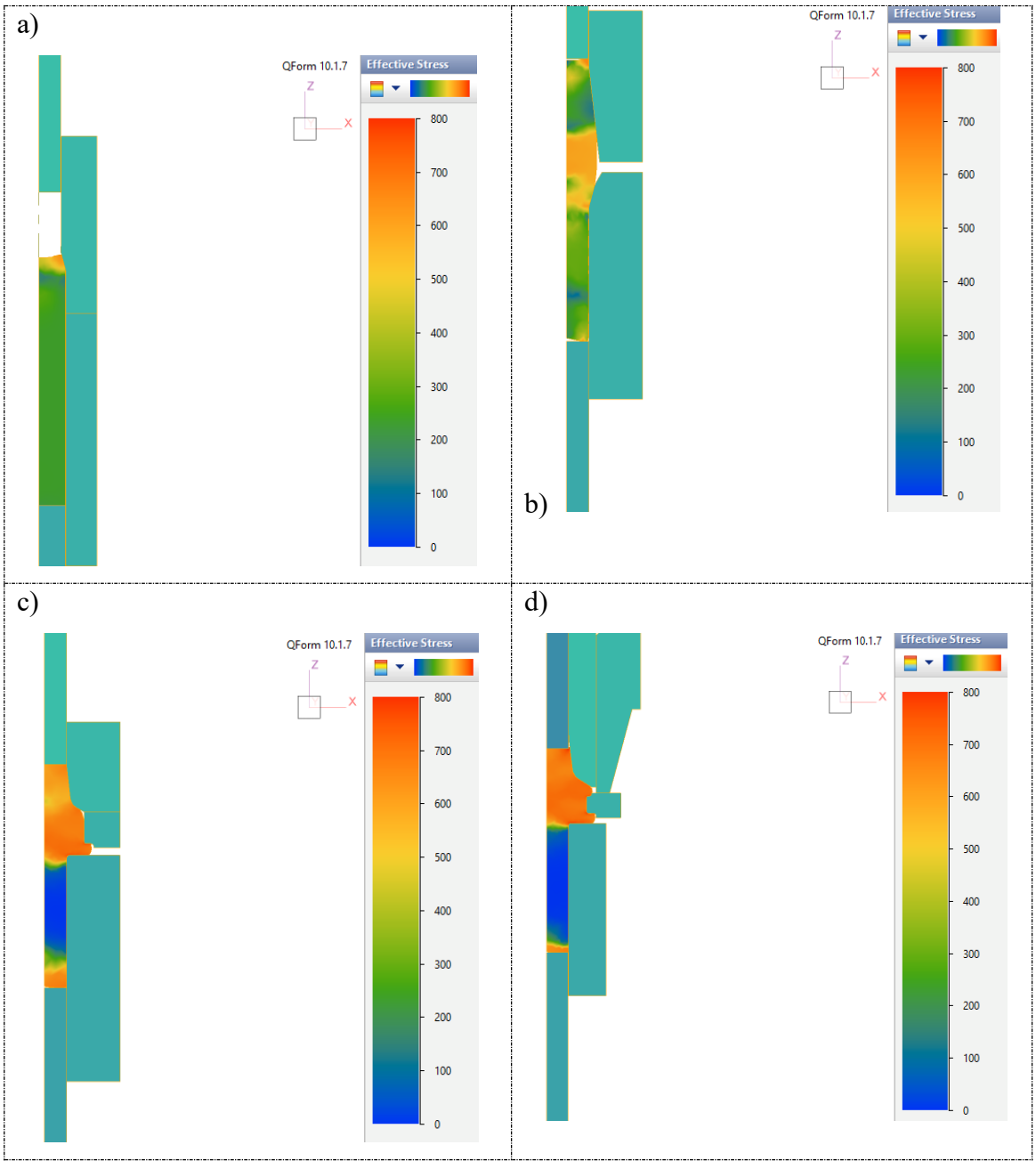


Rys. 6.4.3.2. Rozkład temperatury w kolejnych operacjach procesu kucia: a) operacja 1, b) operacja 2, c) operacja 3, d) operacja 4.

Na rysunku 6.4.3.3 przedstawiono rozkład naprężeń efektywnych uzyskany w wyniku analizy numerycznej MES dla kolejnych operacji procesu kucia. Parametr ten odpowiada skłonności materiału do odkształceń plastycznych. W pierwszej operacji kucia (rys.6.4.3.3a) wartości naprężeń efektywnych są umiarkowane (około 300MPa) w prawie całej objętości wsadu. W strefie przewężania następuje wzrost naprężeń do około 700 MPa. W kolejnych operacjach (rys.6.4.3.3b-c) następuje dalszy wzrost naprężeń efektywnych, szczególnie w strefie formowanego łba śruby (od 500 MPa do 750 MPa). Jest to związane z zmianą kierunku przepływu materiału. W czwartej operacji (rys.6.4.3.3d) największe wartości naprężenia efektywnego występują w rejonie górnego

kołnierza łba (około 800 MPa). Lokalizacja podwyższonych wartości naprężeń wynika z dużych oporów odkształcania oraz z silnego umocnienia materiału wywołanego odkształceniem plastycznym na zimno.

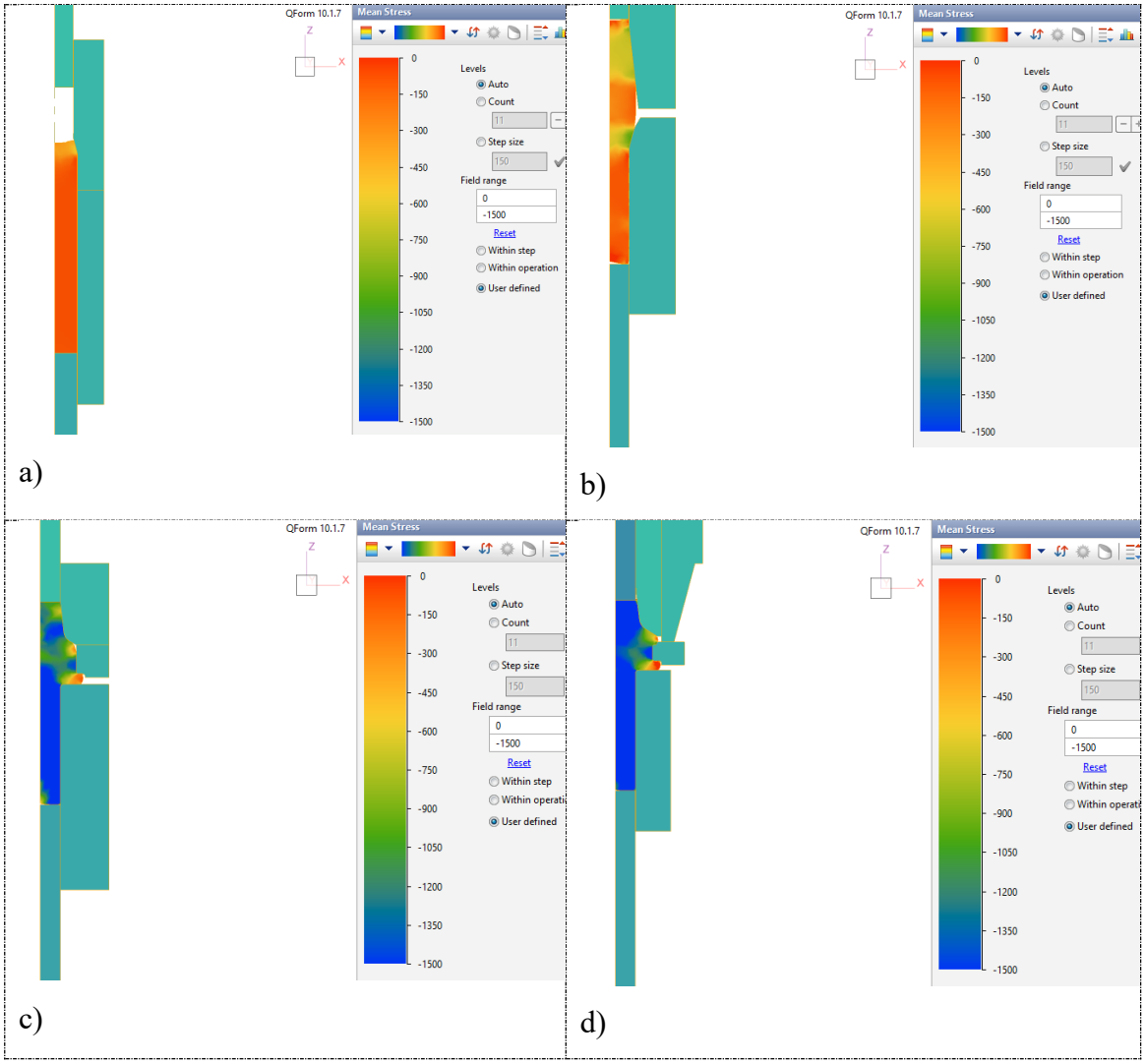
Wartości naprężeń efektywnych wzrastają w kolejnych operacjach procesu kucia. Najwyższe naprężenia wystąpiły podczas trzeciej i czwartej operacji, co wynika z końcowego etapu kształtowania łba śruby oraz wypełniania wykroju matrycy. Maksymalne wartości naprężeń efektywnych występują w obszarach odpowiedzialnych za formowanie najbardziej złożonych geometrycznie elementów łba śruby.



Rys. 6.4.3.3. Rozkład naprężenia efektywnego w kolejnych operacjach procesu kucia: a) operacja 1, b) operacja 2, c) operacja 3, d) operacja 4.

Na rysunku 6.4.3.4. przedstawiono rozkład naprężeń średnich uzyskany z analizy MES dla kolejnych operacji procesu kucia. Naprężenia średnie we wszystkim operacjach kucia, są naprężeniami ujemnymi, ściskającymi. W pierwszej operacji (rys.6.4.3.4a) rozkład naprężeń jest stosunkowo równomierny; naprężenia średnie mają wartości w przedziale od 0 do – 450 MPa. W drugiej operacji (rys.6.4.3.4b) naprężenie średnie ściskające wzrastają do – 1000 MPa w obszarze formowania łba. W trzeciej operacji (rys.6.4.3.4c) naprężenia średnie osiągają wartości około – 1500 MPa. Jednocześnie w dolnej części kołnierza łba naprężenia średnie ściskające wzrastają do wartości zbliżonych do zera. Obszar ten może stanowić potencjalną strefę inicjacji pęknięcia, podczas dalszego przebiegu procesu. W ostatniej operacji (rys.6.4.3.4d), najwyższe wartości naprężeń średnich występują w obszarze górnego i dolnego kołnierza (blisko 0 MPa), co wynika z ograniczenia możliwości swobodnego przepływu materiału podczas końcowego kształtowania kołnierza. Strefy oznaczone kolorem niebieskim wskazują na występowanie bardzo wysokich naprężeń ściskających, które sprzyjają zachowaniu ciągłości materiału i minimalizują ryzyko inicjacji pęknięć. Taki rozkład pola naprężeń jest typowy dla procesów kształtowania dokładnego elementów, w których głównym celem jest uzyskanie wymaganych wymiarów geometrycznych oraz odpowiedniego wypełnienia niewielkich fragmentów wykroju narzędzia.

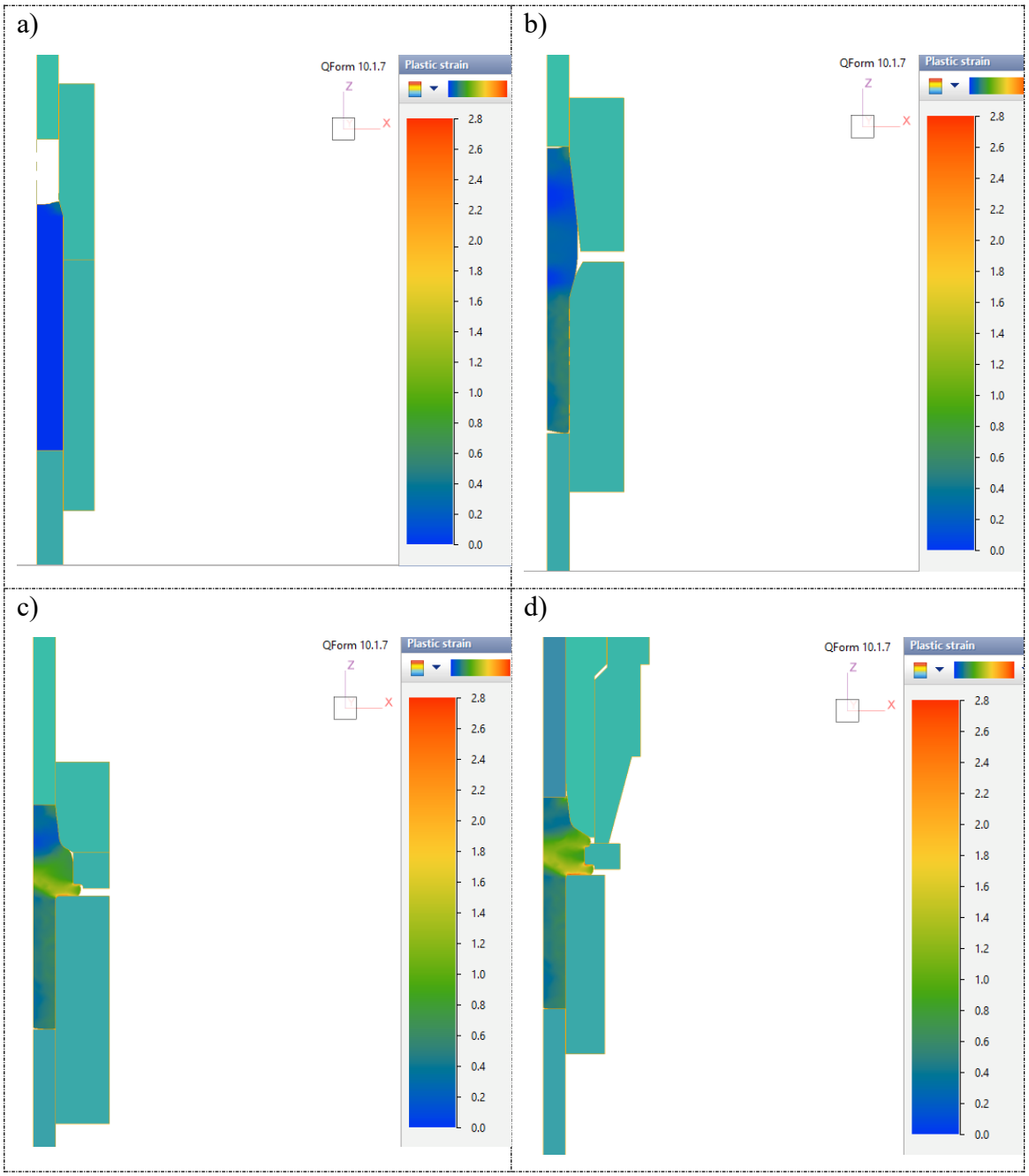
Porównanie rozkładu naprężeń średnich potwierdza sukcesywny wzrost składowej ściskającej w miarę postępu procesu kucia. Wysokie naprężenia hydrostatyczne (wartości ujemne na poziomie – 1500 MPa) w strefach kontaktu materiału z narzędziem sprzyjają utrzymaniu ściskającego stanu naprężenia, co ułatwia płynięcie materiału do trudno dostępnych obszarów wykroju i jednocześnie ogranicza ryzyko powstawania nieciągłości wewnętrznych. Charakterystyczny spadek naprężeń ściskających do poziomu bliskiego 0 MPa (strefy oznaczane kolorem czerwonym i pomarańczowym) odnotowano na krawędziach formowanego kołnierza łba. Obszar ten jest krytyczny pod kątem plastycznego płynięcia: brak dostatecznego trójosiowego ściskania (naprężenia średnie zbliżone do 0 MPa) na wolnej powierzchni materiału stwarza tam lokalne ryzyko inicjacji pęknięć powierzchniowych przed pełnym wypełnieniem gniazda matrycy.



Rys. 6.4.3.4. Rozkład naprężenia średniego w kolejnych operacjach procesu kucia: a) operacja 1, b) operacja 2, c) operacja 3, d) operacja 4. Analiza MES wykonana w programie QForm 10.1.7

Na rysunku 6.4.3.5 przedstawiono rozkład odkształceń efektywnych (zastępczych). W pierwszej operacji kucia (rys.6.4.3.5a) odkształcenia efektywne są niewielkie (0,2 - 0,6) i są rozłożone stosunkowo równomiernie w objętości materiału. W drugiej operacji kucia (rys.6.4.3.5b) występuje nieznaczny wzrost odkształceń w obszarze formowanego łba wyrobu. W kolejnej operacji (rys.6.4.3.5c) zaobserwowano wyraźny wzrost wartości odkształceń zastępczych (1,2 – 1,4) w porównaniu z poprzednimi etapami procesu. Najwyższe wartości występują w strefie przejścia promienia pod łbem śruby (1,8 – 2,2), gdzie następuje intensywna zmiana kierunku płynięcia materiału. W ostatniej operacji (rys.6.4.3.5d) maksymalne wartości odkształceń efektywnych zlokalizowane są w obszarze promieni przejścia pomiędzy górnym

i dolnym kołnierzem łba (1,8 – 2,2) oraz w strefie promienia pod łbem śruby (2,6 – 2,8). Wynika to z intensywnego płynięcia materiału w kierunku promieniowym oraz silnego ścinania na kontakcie z krawędziami roboczymi matrycy.



Rys. 6.4.3.5. Rozkład odkształceń plastycznych w kolejnych operacjach procesu kucia: a) operacja 1, b) operacja 2, c) operacja 3, d) operacja 4. Analiza MES wykonana w programie QForm 10.1.7

Maksymalna wartość odkształcenia wyniosła około 2,8. Osiągnięcie tak dużego stopnia odkształcenia jest możliwe dzięki występowaniu wysokich ujemnych naprężeń średnich, charakterystycznych dla procesów kucia. Naprężenie średnie, określane jako średnia wartość naprężeń głównych, opisuje hydrostatyczny stan naprężenia materiału. Im

bardziej ujemna jest jego wartość, tym większy jest udział naprężeń ściskających, co zwiększa zdolność materiału do odkształceń plastycznych oraz ogranicza ryzyko inicjacji i rozwoju pęknięć. Natomiast w obszarach, w których wartość naprężenia średniego wzrasta (staje się mniej ujemna lub lokalnie dodatnia), zwiększa się ryzyko inicjacji uszkodzeń materiału oraz powstawania nieciągłości. Zjawisko to można ograniczyć poprzez odpowiednią modyfikację konstrukcji narzędzi lub zmianę przebiegu procesu technologicznego, obejmującą między innymi zmianę geometrii wykroju, sekwencji operacji kucia lub warunków odkształcania.

Wyniki symulacji numerycznych, potwierdzone próbami technologicznymi, wykazały poprawność przyjętych założeń technologicznych. Przedstawiona technologia nie wyczerpuje jednak wszystkich możliwych wariantów realizacji procesu kucia i może stanowić punkt wyjścia do dalszych prób technologicznych.

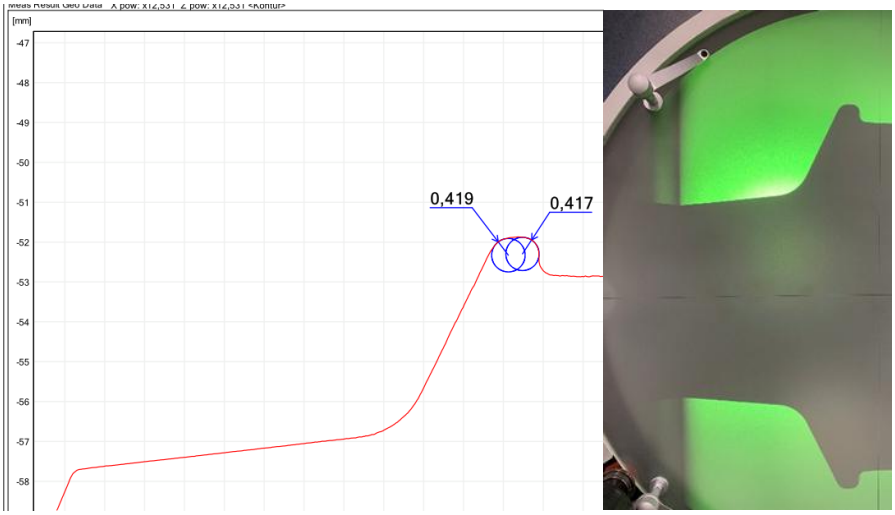
7. Produkcja prototypów

Początkowo proces wytwarzania prototypów ŚŁS realizowano z zastosowaniem technologii obróbki skrawaniem, w której kształtowano geometrię łba wraz z elementem kulistym i sworzniem (rys. 7.1.). W kolejnym kroku walcowano gwint.



Rys. 7.1. Zdjęcie prototypu łącznika toczonego wraz z elementem kulistym

Obróbka skrawaniem umożliwiła bardzo precyzyjne odwzorowanie kształtu (rys. 7.2.) oraz uzyskanie wysokiej jakości powierzchni elementu, co czyni ją odpowiednią na etapie wykonywania prototypów czy małych serii. Jednakże technologia ta cechuje się niską wydajnością w przypadku produkcji wielkoseryjnej oraz jest niekorzystna dla elementów poddawanych dużym obciążeniom eksploatacyjnym, ponieważ w trakcie procesu dochodzi do przerwania ciągłości włókien struktury materiału, co może obniżać jego wytrzymałość zmęczeniową.



Rys. 7.2. Zdjęcie obrazujące prawidłowe odwzorowanie zarysu promieni na łbie śruby wykonanej za pomocą obróbki skrawaniem; obraz z profilografu, obraz z projektora

Wydajność tego procesu wynosiła średnio 4 sztuki na minutę, co pozwoliło na przygotowanie serii prototypów. Koszt wytworzenia prototypów oszacowano na poziomie 24 € na 100 sztuk, uwzględniając zużycie materiału, czas pracy maszyn oraz koszty robocizny związane z przygotowaniem i kontrolą jakości próbek. Analiza ta pozwala nie tylko ocenić efektywność ekonomiczną wytwarzania prototypów, ale również stanowi punkt odniesienia do porównania z późniejszymi etapami procesu, takimi jak kształtowanie łbów przy użyciu matryc segmentowych, gdzie przewidywana jest wyższa wydajność i niższe koszty jednostkowe.

8. Próby technologiczne kucia z zastosowaniem matryc segmentowych

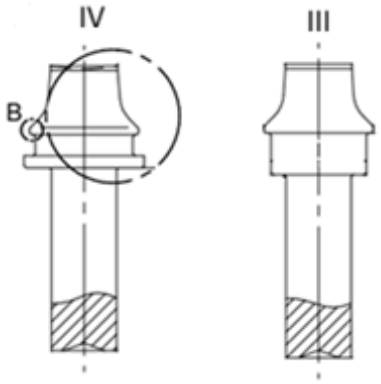
Do kształtowania wklęsło – wypukłej powierzchni bocznej wyrobów kształtowanych obróbką plastyczną zastosowano matryce segmentowe.

W realizowanych badaniach próby technologiczne wykonywano na kuźniarce w 5- operacyjnym procesie kucia. Matryce segmentowe zamontowano w czwartym gnieździe ruchomego suwaka kuźniarki. Badania obejmowały analizę wpływu różnych kształtów spęczek w operacji poprzedzającej kucie segmentowe na przebieg procesu oraz końcową jakość śrub. W szczególności oceniano stopień wypełnienia matrycy w promieniach przejścia powierzchni wklęsłej w powierzchnię wypukłą. Opracowano dwa warianty technologiczne procesu kucia na zimno, nad którymi pracowano równolegle. W obu wariantach proces obejmował pięć kolejnych operacji kucia, gdzie operacje I, II i III oraz operacja V były realizowane przy użyciu matryc litych. Trzy pierwsze etapy odpowiadały za wstępne formowanie kształtu spęczki, a piąty za finalne nadanie podstawowej geometrii elementu tj. napędu znajdującego się w dolnej części trzpienia śruby. Natomiast operacja IV przeprowadzana była z zastosowaniem matryc segmentowych, które miały za zadanie umożliwienie precyzyjnego wypełnienie stref wklęsło-wypukłych podczas przepływu materiału. Bezpośrednio po zakończeniu kucia skrawano fazę na końcu trzpienia śruby oraz walcowano gwint. Wszystkie powyżej opisane kroki produkcyjne były realizowane na kuźniarce poziomej.

8.1. Próby technologiczne kucia z zastosowaniem matryc segmentowych na operacji IV – wariant I

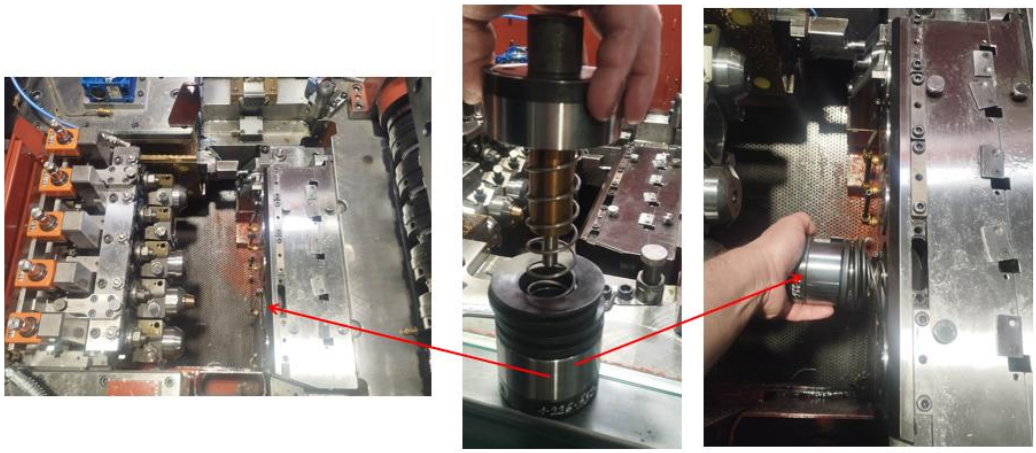
Proces technologiczny obejmował pięć kolejnych etapów kucia. W pierwszej operacji przeprowadzano wstępne przewężanie materiału, natomiast w operacji drugiej formowano spęczkę do wstępnego kształtowania łba elementu. W wariancie pierwszym, etap trzeci obejmował formowanie górnego kołnierza łba w matrycy litej. Natomiast w czwartej operacji, zaprojektowano kształtowanie dolnego kołnierza przy użyciu matrycy segmentowej. W operacji piątej zaprojektowano formowanie napędu śruby, który w analizowanym przypadku umiejscowiony jest w trzpieniu śruby. Kształt spęczki w operacji IV, gdzie zaplanowano zastosowanie matrycy

segmentowej oraz w operacji III (poprzedzającej operację, w której zastosowano matrycę segmentową) przedstawiono na rys. 8.1.1.

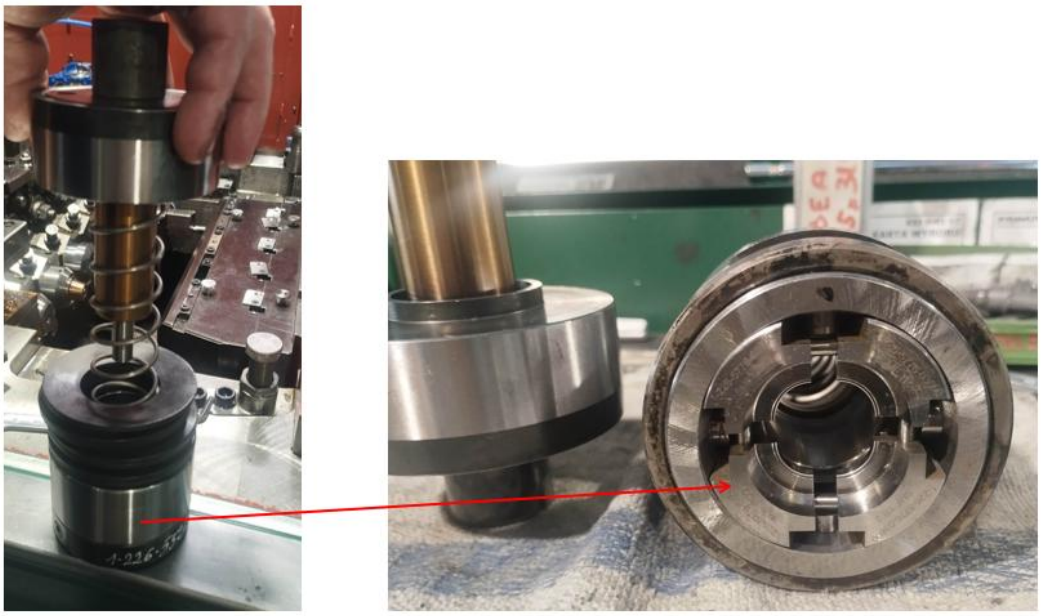


Rys. 8.1.1. Kształt półwyrobu po IV i III operacji kucia – pierwszy wariant prób technologicznych

Na rys. 8.1.2 pokazano układ gniazd roboczych w przestrzeni kuźniarki, ze wskazaniem operacji IV, w której umiejscowiono matrycę segmentową o konstrukcji przedstawionej na rys. 8.1.3.



Rys. 8.1.2. Układ gniazd roboczych w przestrzeni kuźniarki, ze wskazaniem operacji IV



Rys. 8.1.3. Matryca segmentowa zastosowana w operacji IV – wariant I prób technologicznych

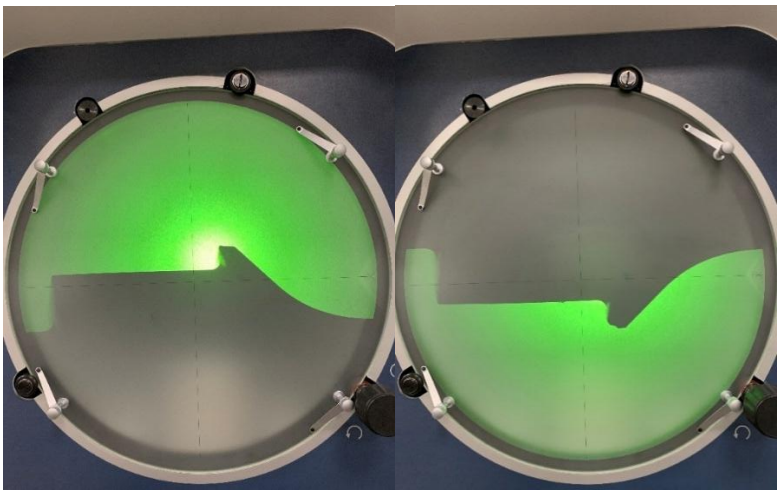
Wariant pierwszy prób technologicznych nie przyniósł oczekiwanych rezultatów. W trakcie jego realizacji udało się ukształtować jedynie półwyroby w operacjach od I do III, co zostało zaprezentowane na Rys. 8.1.4.

Wykonanie operacji IV okazało się niemożliwe z powodu niekontrolowanego otwierania się czterech segmentów matrycy w trakcie procesu kucia. Spowodowane było to występowaniem wysokich nacisków, wynikających z dużego oporu odkształcania. Alternatywnie, problem ten mógł mieć swoje źródło w doborze sprężyn o zbyt małej sztywności, co skutkowało niewystarczającym dociskiem segmentów matrycy podczas kucia.

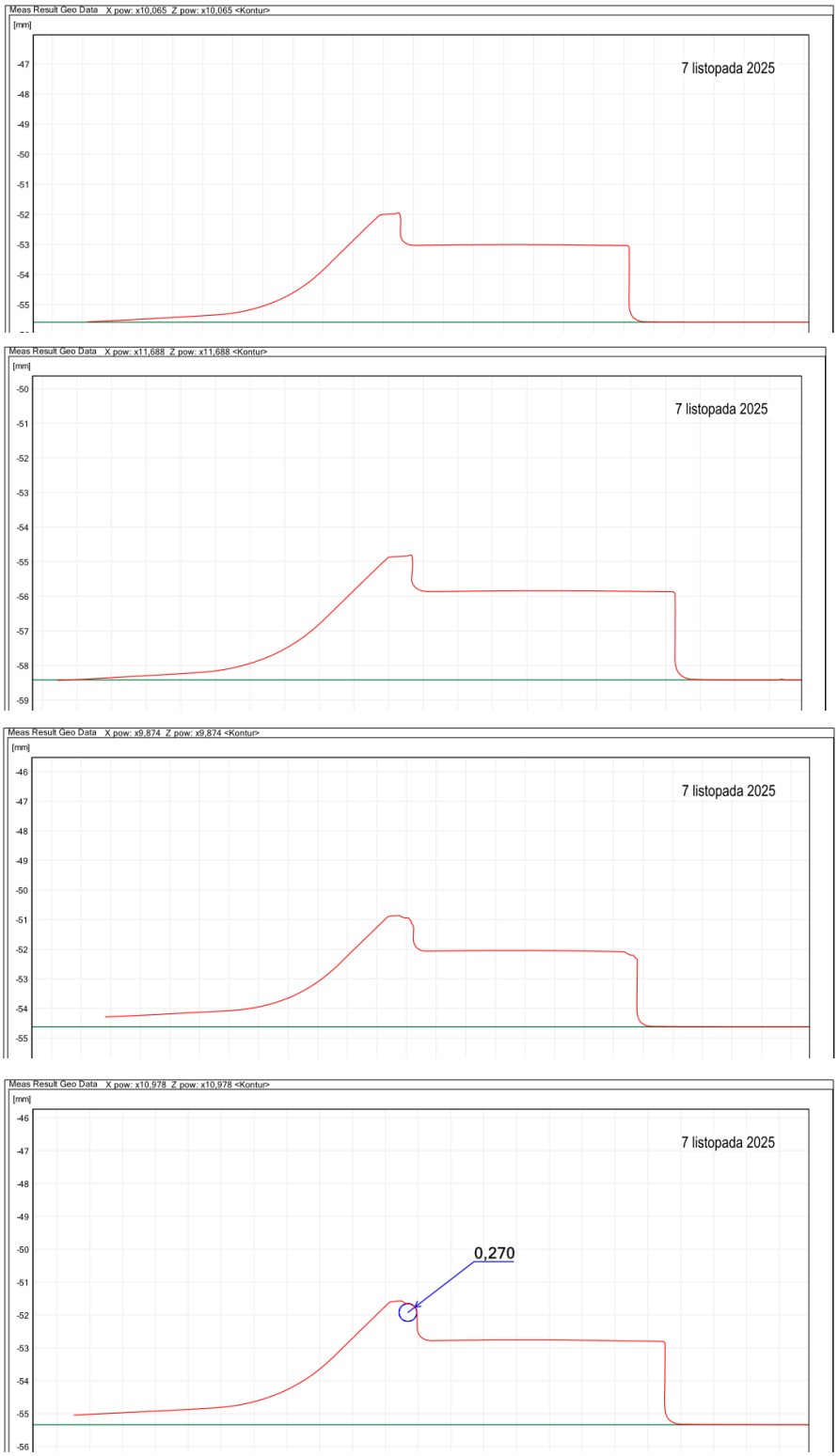


Rys. 8.1.4. Półwyroby otrzymane w operacjach I, II i III – wariant I prób technologicznych

Dodatkowo, promień górnego kołnierza uzyskany w wariancie pierwszym nie spełniał wymagań określonych dla wyrobu końcowego. Zamiast zakładanego promienia 0,5 mm, zmierzona wartość wynosiła jedynie 0,27 mm (rys. 8.1.5 – rys. 8.1.6.), co wskazuje na niedostateczne wypełnienie matrycy w tym obszarze.



Rys. 8.1.5. Zdjęcie zarysu promieni uzyskanych w operacji III kucia – wariant I prób technologicznych

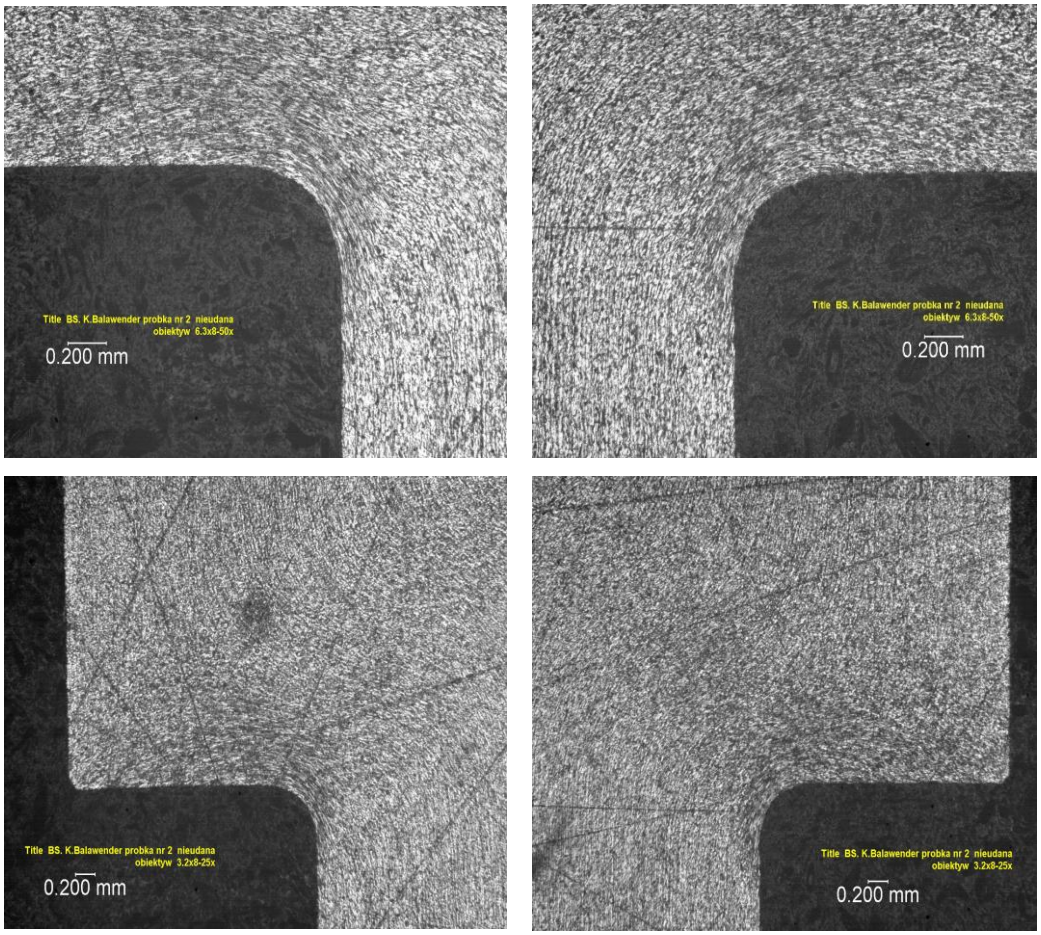


Rys. 8.1.6. Zarys promienia po operacji III w wariancie pierwszym prób technologicznych

Realizowano również badania układu włókien materiału w celu stwierdzenia, czy nie doszło do jego zaburzenia w trakcie procesu kucia oraz czy struktura włókien pozostaje prawidłowa zgodnie z wymaganiami normy USCAR 8 [56], stanowiącej o prawidłowym przepływie materiału w obszarach krytycznych ze względu na wytrzymałość śrub. Analiza ta pozwoliła ocenić wpływ przebiegu procesu technologicznego na integralność mikrostruktury i wytrzymałość materiału, co stanowi istotny element weryfikacji poprawności wykonania operacji kucia. Układ włókien w wariancie pierwszym prób technologicznych zbadano na spęczce ukształtowanej w operacji III (rys. 8.1.7. – 8.1.8.). Wyniki tych badań, potwierdziły, że układ włókien jest prawidłowy i nie uległ zaburzeniu w trakcie procesu kucia, widoczne są linie płynięcia wzdłuż zarysu odkuwki, nie wychodzące na zewnątrz.



Rys. 8.1.7. Układ włókien w operacji III wariantu pierwszego prób technologicznych

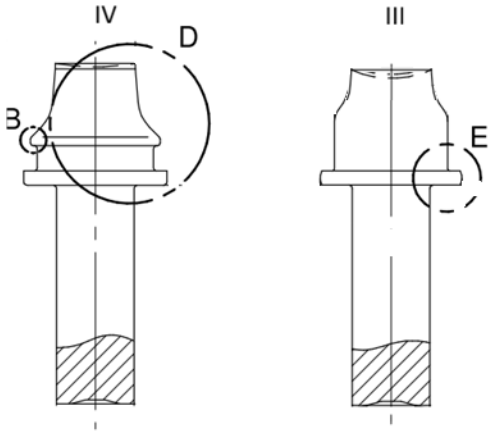


Rys. 8.1.8. Układ włókien w obszarze promienia pod górnym kołnierzem łba (zdjęcia górne);
w obszarze przejścia łba w szyjkę (dolne zdjęcia)– operacja III pierwszego wariantu prób technologicznych

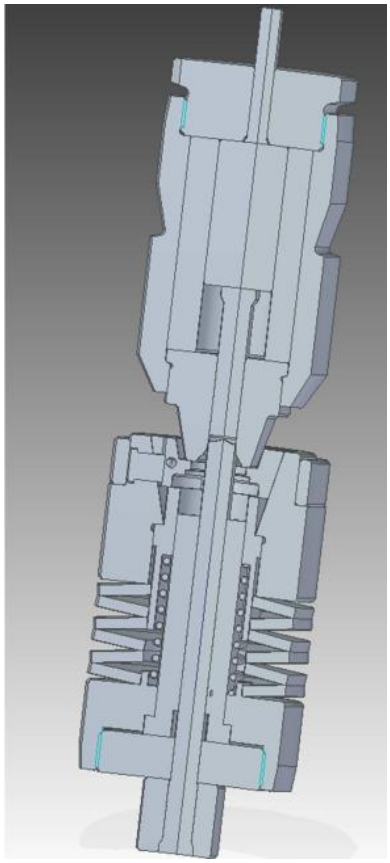
8.2. Próby technologiczne kucia z zastosowaniem matryc segmentowych na operacji IV przy zmianie kształtu spęczek – wariant II

Podobnie jak w wariancie pierwszym, również w wariancie drugim, proces technologiczny został zaprojektowany tak by obejmował pięć kolejnych etapów kucia. W pierwszej operacji przeprowadzano wstępne przewężanie materiału, natomiast w operacji drugiej formowano spęczkę do wstępnego kształtowania łba elementu. W wariancie drugim, operacja trzecia obejmowała formowanie dolnego kołnierza łba w matrycy litej. Natomiast w czwartej operacji wariantu drugiego, zaprojektowano kształtowanie górnego kołnierza przy użyciu matrycy segmentowej. W operacji piątej zaprojektowano formowanie napędu śruby. Kształt spęczki w operacji IV, gdzie zaplanowano zastosowanie matrycy segmentowej oraz w operacji poprzedzającej

przedstawiono na rys. 8.2.1. Natomiast rys. 8.2.2. przedstawia model układu narzędzi zastosowanych w operacji IV.



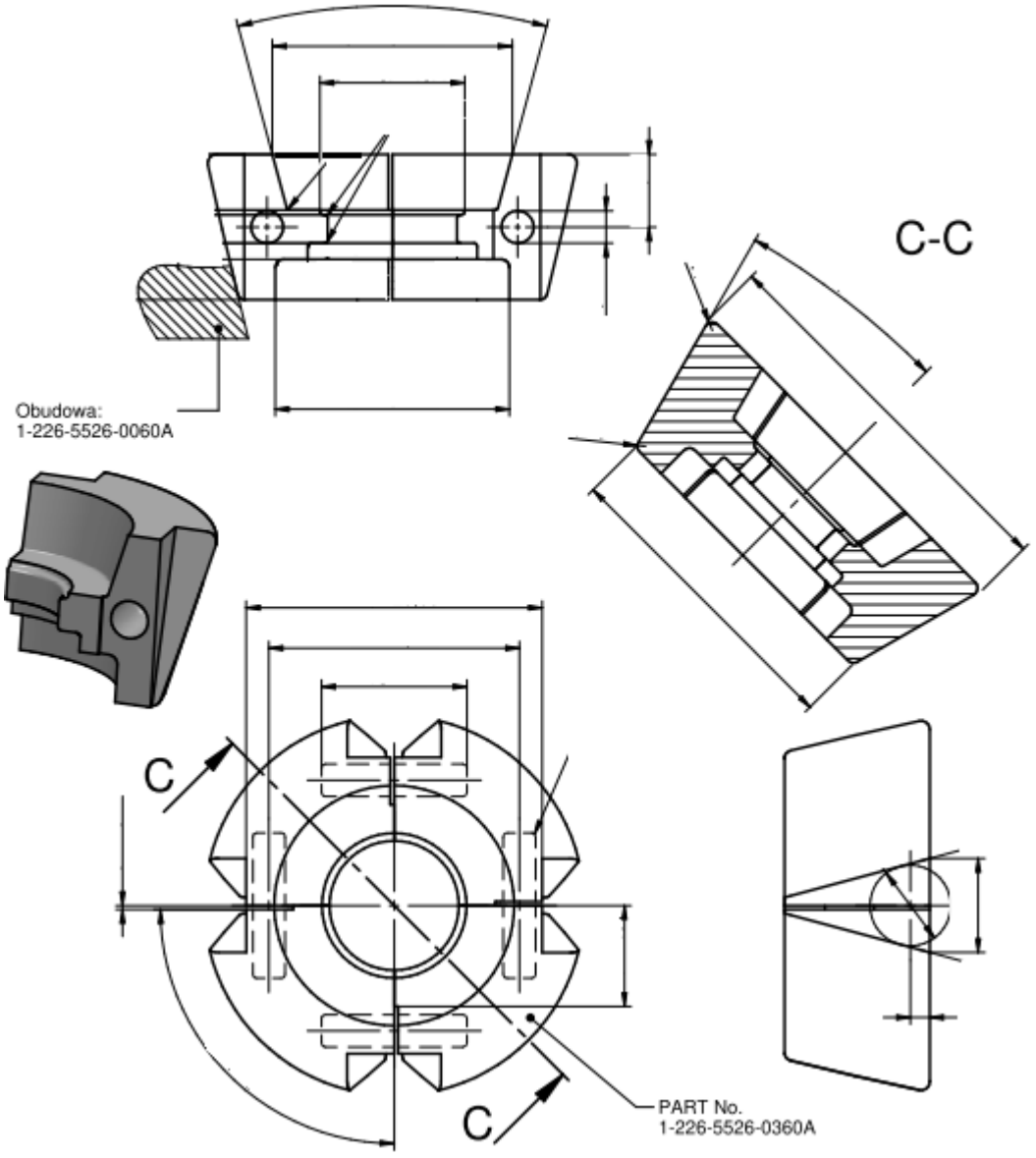
Rys. 8.2.1. Kształt spęczki w IV oraz III operacji kucia – drugi wariant prób technologicznych



Rys. 8.2.2. Model narzędzi operacji IV

Wariant drugi prób technologicznych okazał się skuteczny; otrzymano założony końcowy kształt łba. Rysunek matrycy segmentowej zaprojektowanej

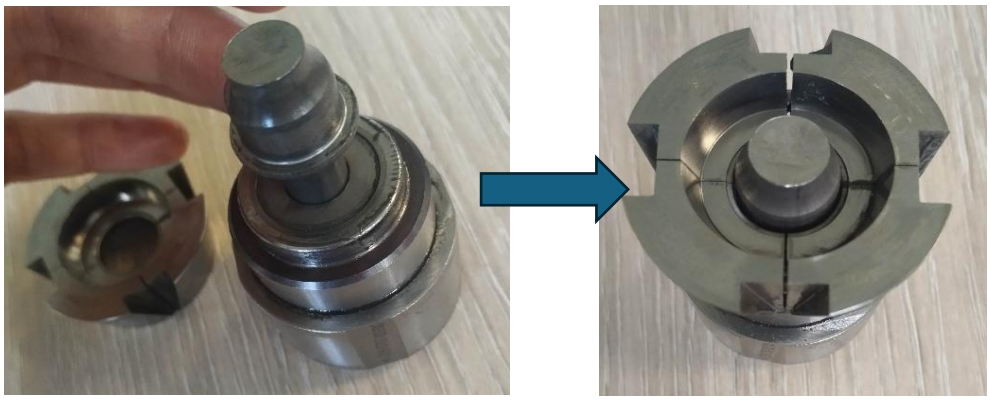
w tej wersji technologicznej zaprezentowano na rys. 8.2.3. Zdjęcie obudowy matrycy segmentowej oraz samej matrycy segmentowej zastosowanej w tym przypadku zaprezentowano na rys. 8.2.4. i rys. 8.2.5. Półwyroby ukształtowane w kolejnych gniazdach kuźniarki pokazano na rys. 8.2.6.



Rys. 8.2.3. Matryca segmentowa opracowana w ramach prób technologicznych wariantu II



Rys. 8.2.4. Obudowa matrycy segmentowej opracowanej w ramach prób technologicznych wariantu II

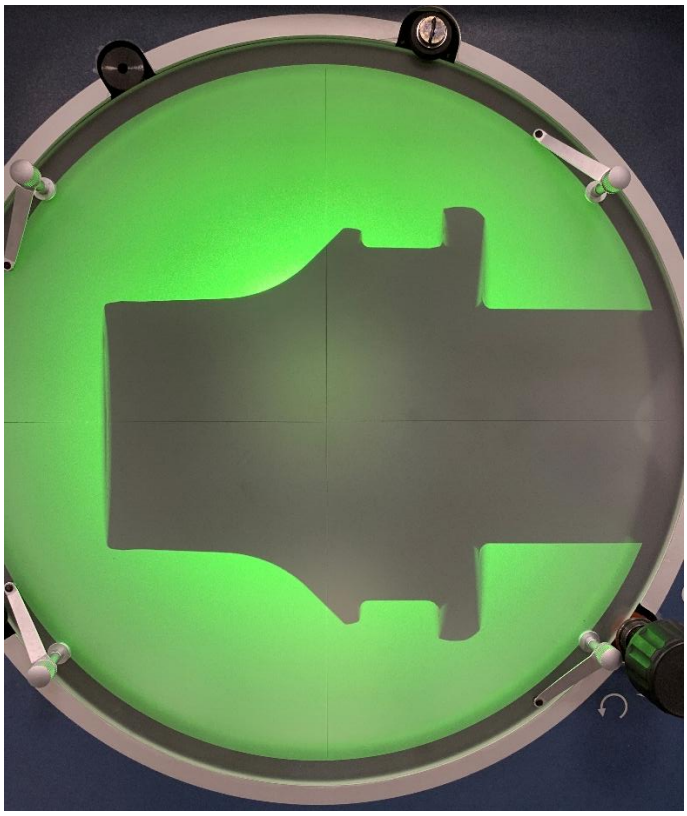


Rys. 8.2.5. Matryca segmentowa wraz z ukształtowaną spęczką umieszczona w tulejce matrycy

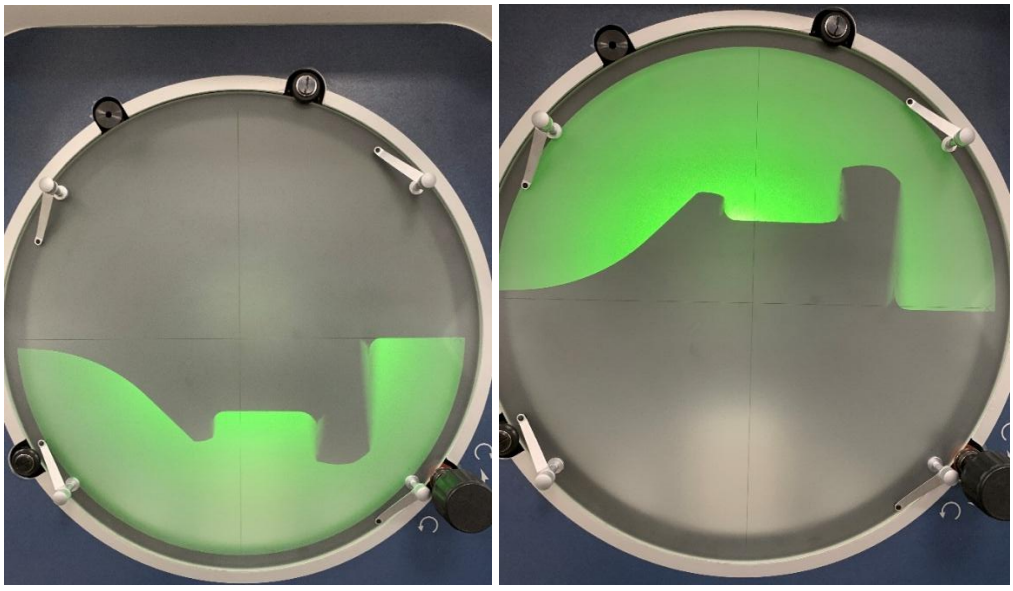


Rys. 8.2.6. Spęczki ukształtowane w wariancie drugim prób technologicznych

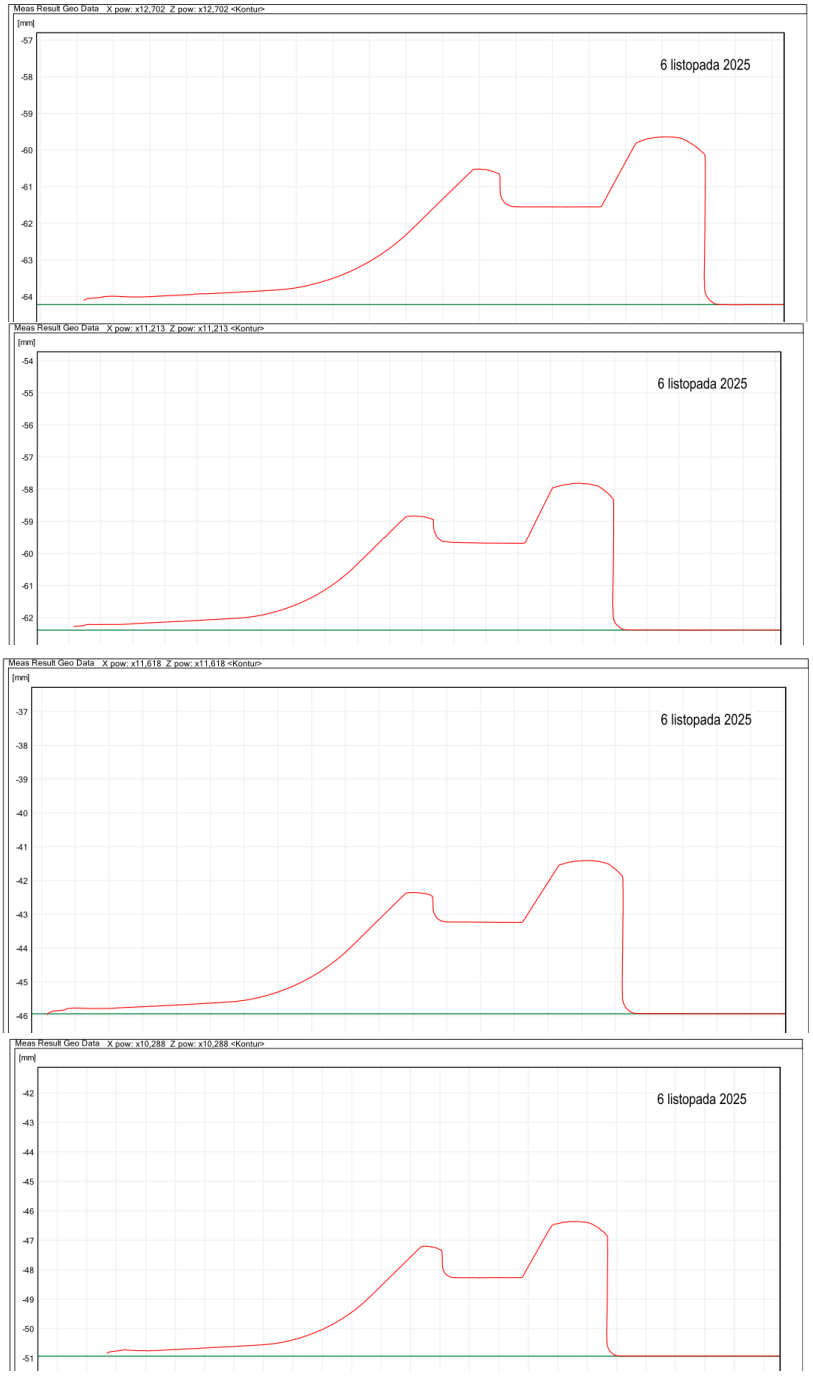
Również w tym wariancie dokonano pomiarów krytycznych dla tego elementu promieni (rys. 8.2.7. – rys. 8.2.9) oraz analizy układu włókien (rys. 8.2.10 - rys. 8.2.12). Analiza wyników wykazała, że pomimo uzyskania finalnego kształtu łba śruby, nie uzyskano pełnej zgodności promieni z wymaganiami wyrobu finalnego; uzyskane zarysy nadal nie posiadały wymaganego promienia przejścia. Jednakże, w porównaniu z wynikami wariantu pierwszego, otrzymane promienie spełniały warunek funkcjonalności wyrobu. Niemniej jednak, ze względu na ryzyko nieprawidłowego osadzenia gumowej uszczelki przegubu kulistego łącznika stabilizatora, konieczna okazała się dalsza optymalizacja rozkładu odkształceń w strefie łba.



Rys. 8.2.7. Kształt łba spęczki po operacji IV wykonanej w drugim wariancie prób technologicznych



Rys. 8.2.8. Zdjęcie zarysu promieni uzyskanego w wariancie II prób technologicznych



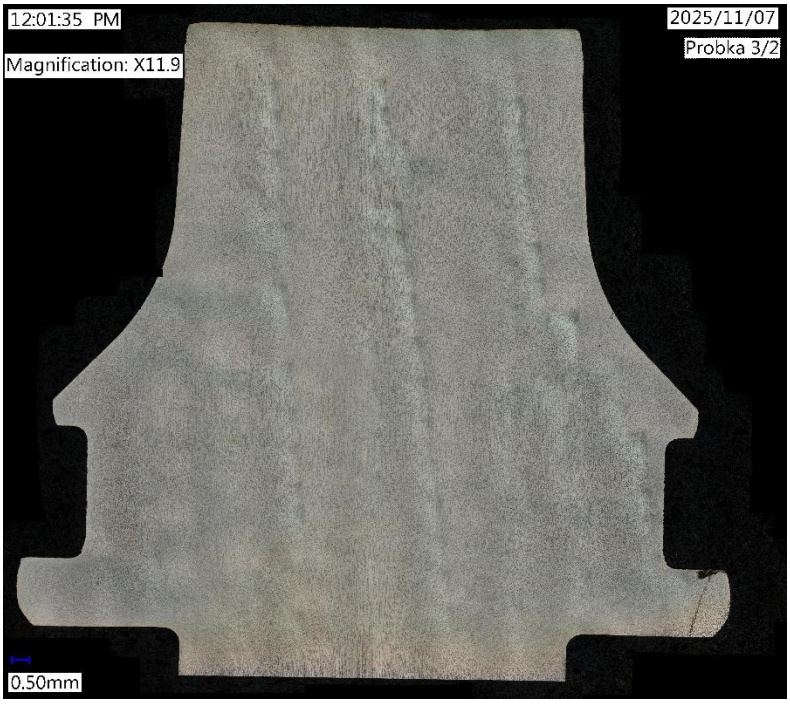
Rys. 8.2.9. Zarys promieni kołnierzy po operacji IV w wariancie drugim prób technologicznych

Badano układ linii płynięcia również w operacji III, w celu weryfikacji stopnia wypełnienia matrycy w obszarze dolnego kołnierza (rys. 8.2.10.). Uzyskane wyniki wskazują na prawidłowe wypełnienie dolnego kołnierza.



Rys. 8.2.10. Układ linii płynięcia w operacji III wariantu drugiego prób technologicznych

W operacji IV również otrzymano prawidłowy układ włókien (Rys. 8.2.11. – 8.2.12.); nie uległ on zaburzeniu w trakcie procesu kucia. Prawidłowy przebieg linii płynięcia materiału podczas kucia stanowi istotny wskaźnik właściwego doboru parametrów procesu oraz odpowiedniego ukształtowania spęczek na poszczególnych etapach operacji technologicznych.

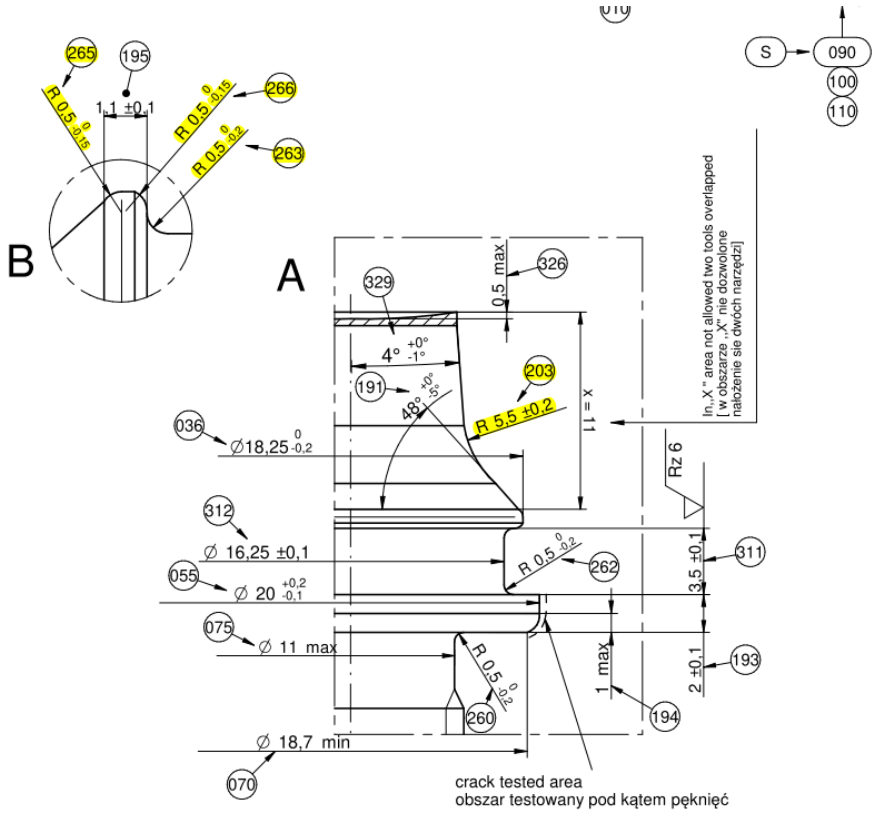


Rys. 8.2.11. Układ linii płynięcia w operacji IV wariantu drugiego prób technologicznych



Rys. 8.2.12. Układ linii płynięcia materiału w obszarze promienia górnego kołnierza

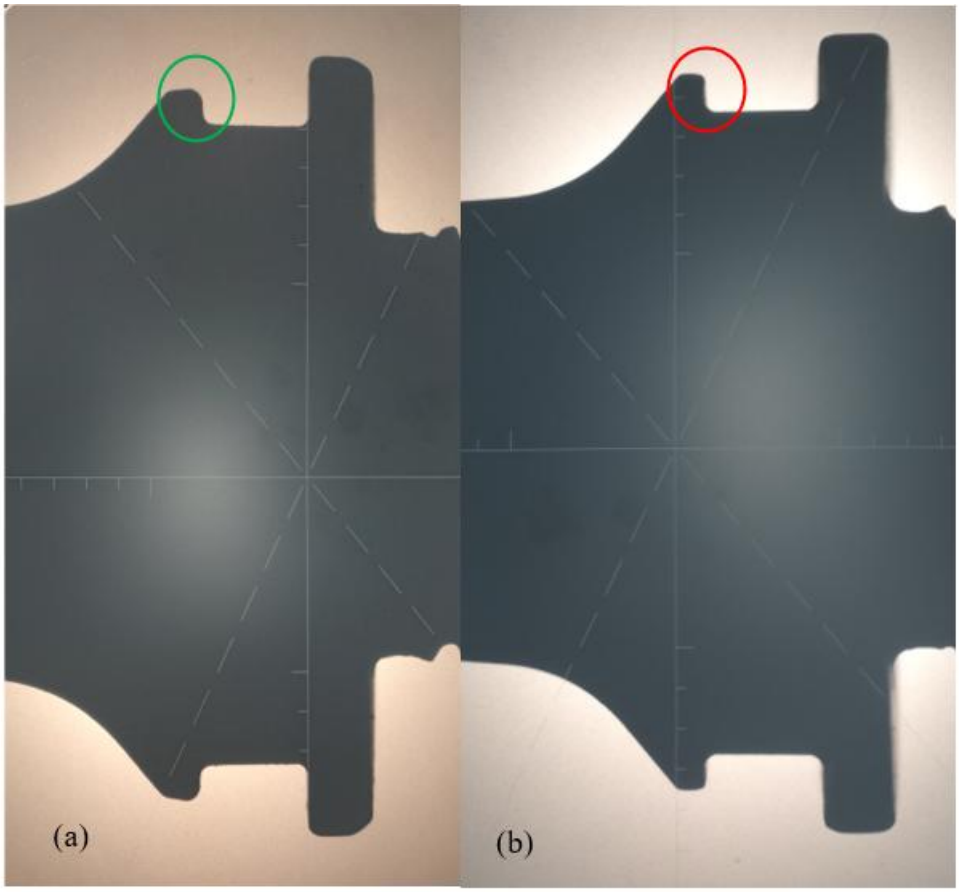
Zgodnie z rysunkiem technicznym śruby oraz wymaganiami klienta, klasa dokładności wymiarowej, która musi zostać spełniona dla analizowanej śruby to klasa A wg normy ISO 4759-1 [57], która cechuje się najwyższą precyzją. Ze względu na wąskie tolerancje geometryczne, wynikające z przywołanej normy, istnieją parametry wyrobu, których utrzymanie jest trudne w procesie kucia na zimno (rys. 8.2.13)



Rys. 8.2.13. Rysunek łba śruby z zaznaczonymi na żółto problematycznymi wymiarami

W przypadku produkcji tego wyrobu poprzez obróbkę skrawaniem, wymiary te nie stanowią problemu. Natomiast, w seryjnym procesie kucia, wąskie pola tolerancji są bardzo trudne do utrzymania.

Ze względu na zastosowanie ŚŁS jako elementu zawieszenia samochodu niezwykle ważne jest uzyskanie prawidłowego zarysu promienia górnego kołnierza, co zostało przedstawione na rys. 8.2.14.



Rys. 8.2.14. Zdjęcie łba śruby wraz z wskazaniem problematycznego promienia przejścia wykonanego prawidłowo (a); z występującą ostrą krawędzią – nieakceptowalne (b)

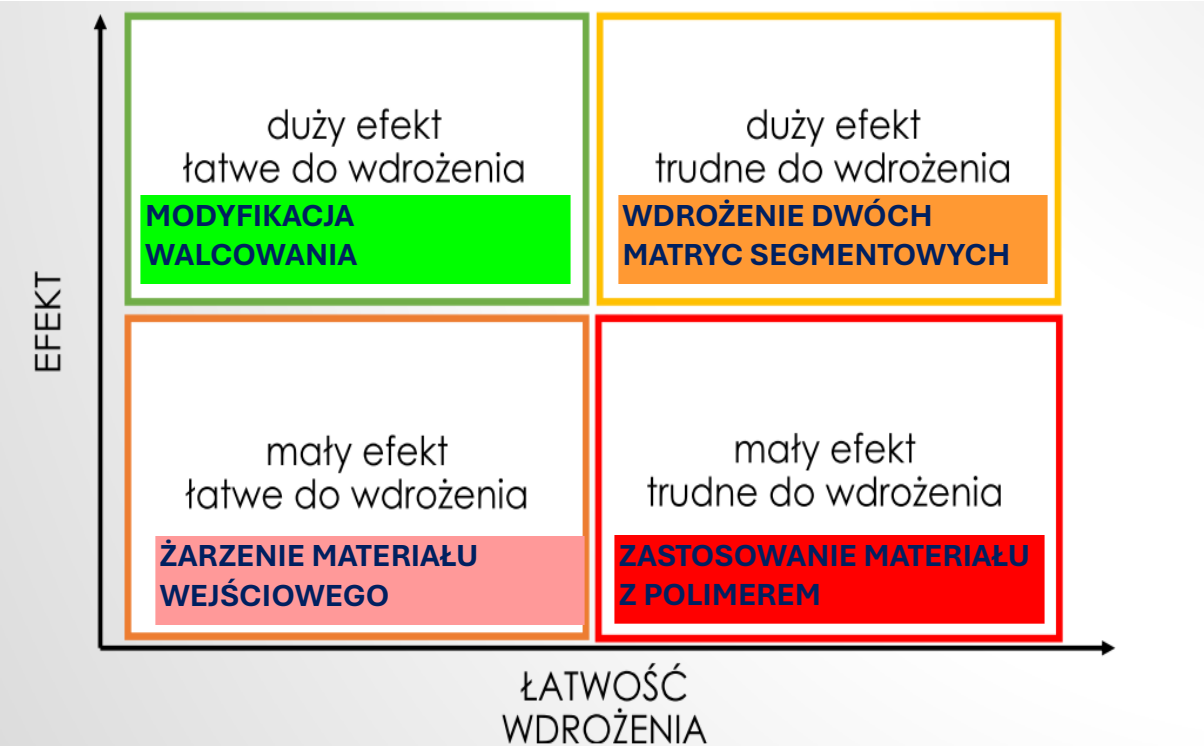
Dla zaznaczonych na żółto na rys. 8.2.13. wymiarów, uzyskano niezgodne wyniki pomiarów, które zapisano w tabeli 8.2.1. Niezgodności te nie są możliwe do zaakceptowania ze względu na ryzyko utraty funkcjonalności wyrobu oraz ryzyko powstawania uszkodzeń łącznika stabilizatora podczas eksploatacji. W związku z powyższym podjęto dalsze próby opisane w kolejnym podrozdziale.

Tabela 8.2.1. Wyniki pomiarów problematycznych parametrów łba ŚŁS

Numer parametru	Wymagany wymiar, mm	Uzyskany wymiar, mm	Ocena pomiaru
203	5,3-5,7	6,03 – 6,15	niezgodny
263	0,3-0,5	0,11 – 0,38	niezgodny
256	0,35-0,5	0,25 – 0,73	niezgodny
266	0,35-0,5	0,44 – 0,72	niezgodny

8.3. Próby technologiczne kucia z zastosowaniem matryc segmentowych na operacji IV przy zmianie kształtu spęczek z zastosowaniem dodatkowego walcowania krytycznego promienia łba

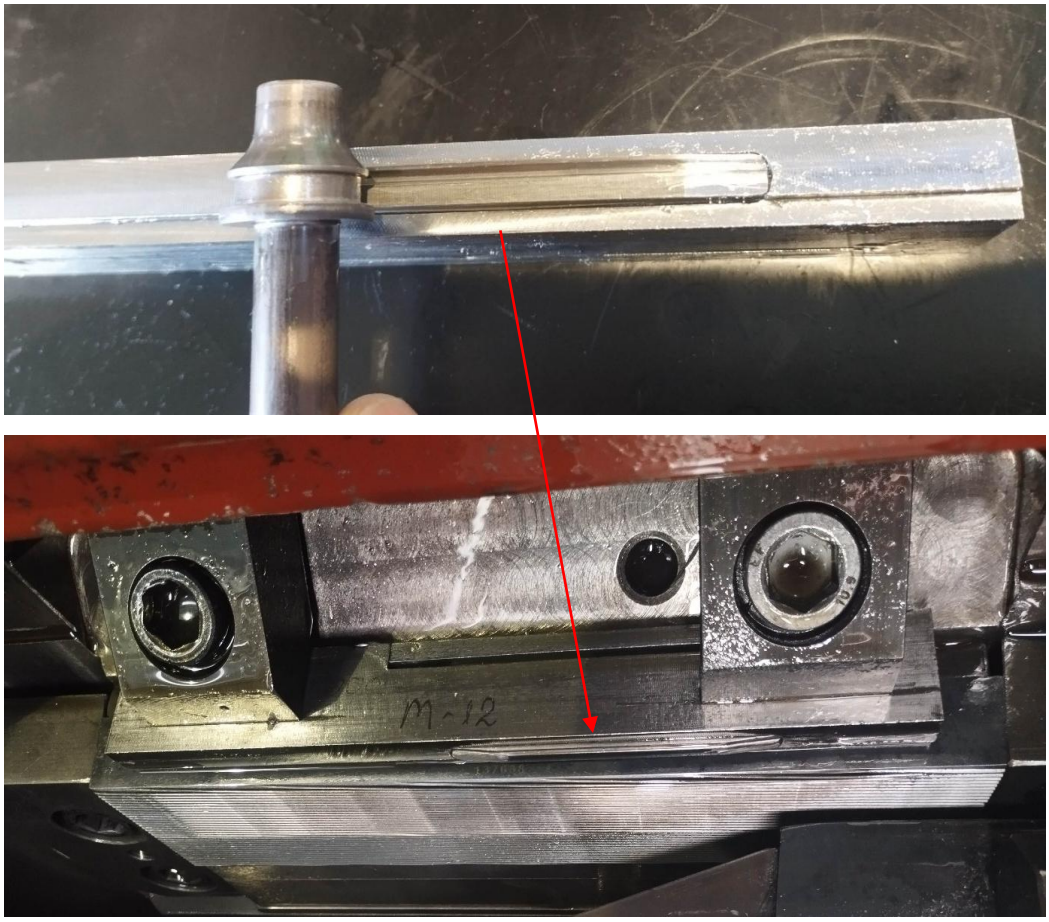
Rozważano kilka możliwości optymalizacji geometrii promienia na łbie, opierając analizę na macierzy decyzyjnej (rys. 8.3.1.). Do oceny poszczególnych wariantów przyjęto zestaw kryteriów obejmujący: wpływ na jakość kształtowania w strefie łba, oddziaływanie na trwałość narzędzi, koszty wdrożenia, czas wdrożenia, ryzyko wystąpienia niepożądanych zjawisk technologicznych oraz złożoność modyfikacji procesu. Przypisanie wag poszczególnym kryteriom pozwoliło na obiektywne porównanie rozwiązań. Zastosowanie macierzy decyzyjnej umożliwiło jednoznaczne wskazanie wariantu, który zapewniał największą poprawę jakości promienia przy jednocześnie najniższym poziomie trudności wdrożenia.



Rys. 8.3.1. Macierz decyzyjności

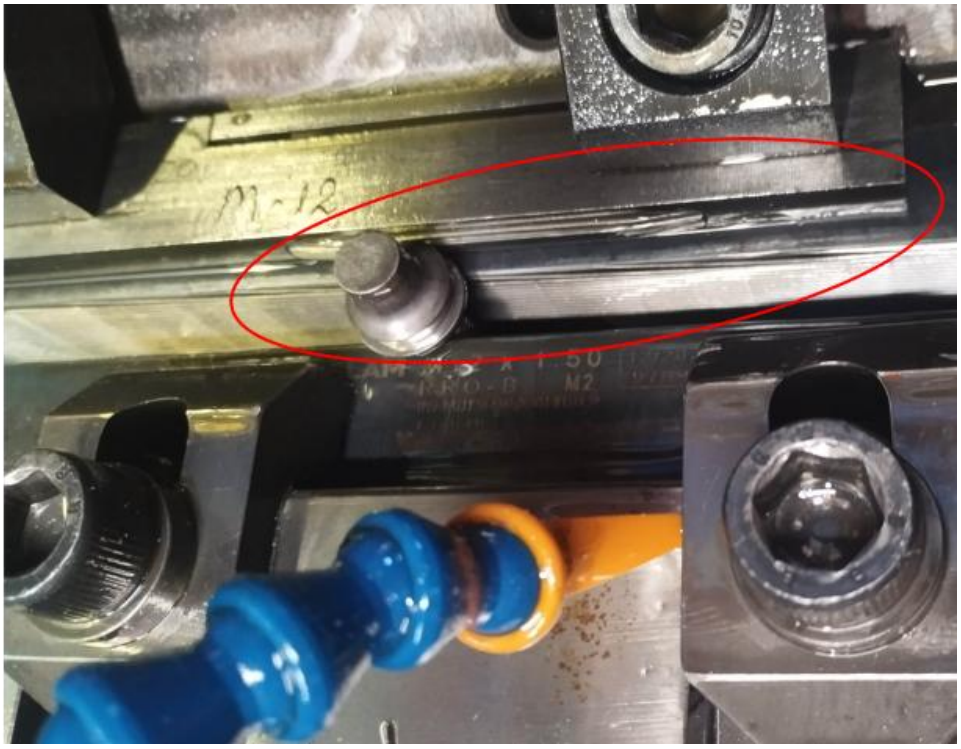
Na tej podstawie wybrano rozwiązanie - modyfikacji procesu walcowania gwintu i przyjęto je do dalszych badań eksperymentalnych oraz weryfikacji w warunkach

produkcyjnych. W tym celu opracowano dodatkową szczękę kalibrującą promień (rys. 8.3.2) równocześnie wraz z walcowaniem gwintu.



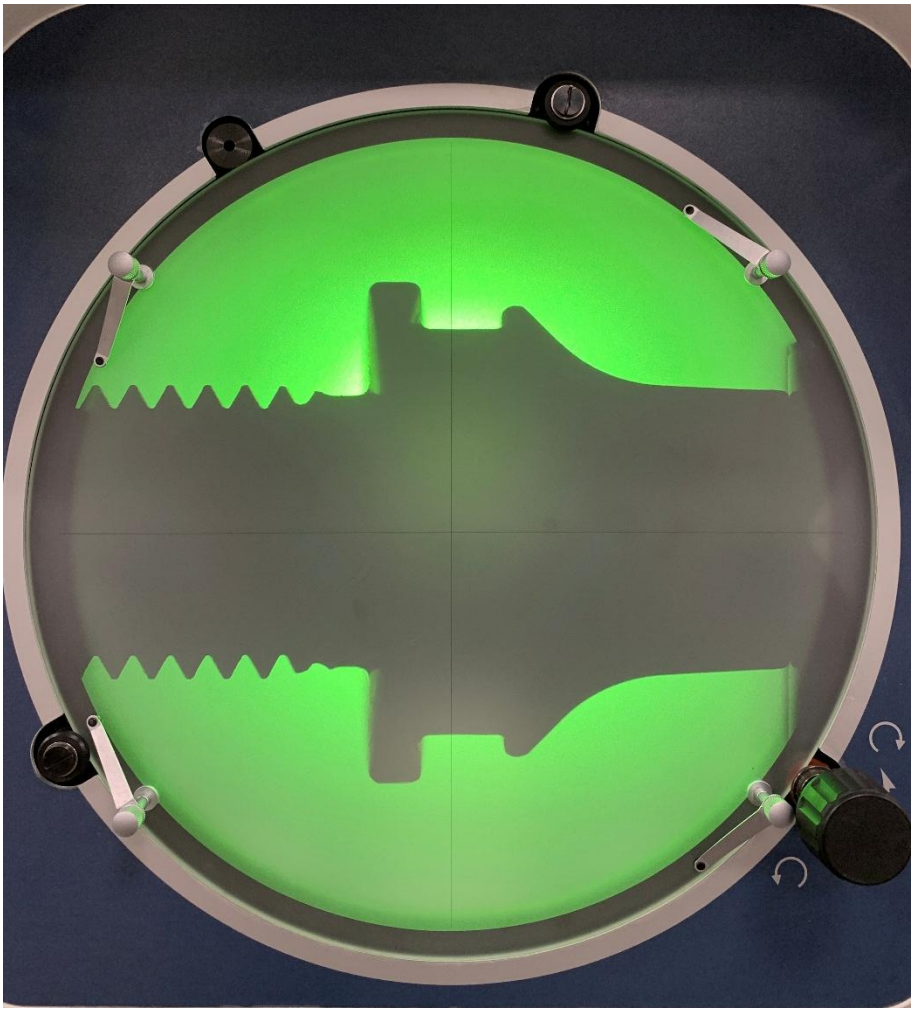
Rys. 8.3.2. Dodatkowa szczęka do walcowania promienia

Dodatkowa szczęka walcująca promień (rys. 8.3.3.) umożliwiła precyzyjniejsze formowanie tego newralgicznego obszaru wyrobu.

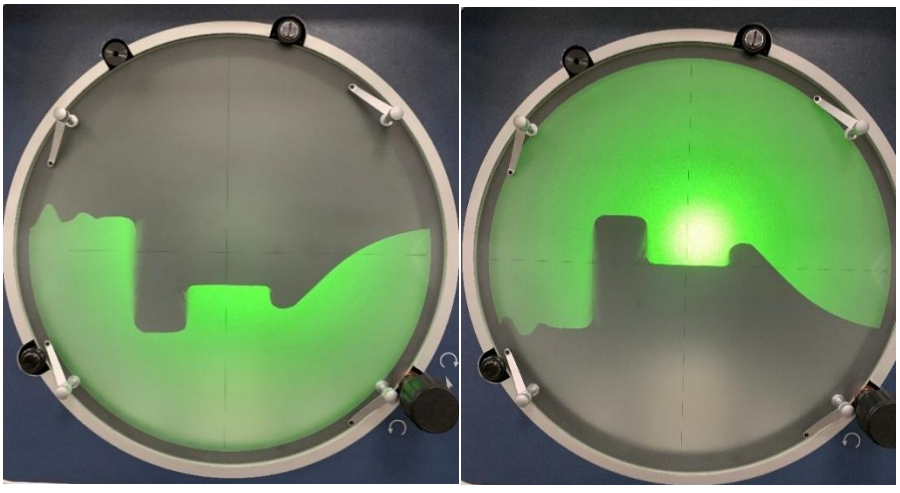


Rys. 8.3.3. Walcowanie gwintu z równoczesnym kalibrowaniem kształtu promienia na łbie za pomocą dodatkowej szczęki

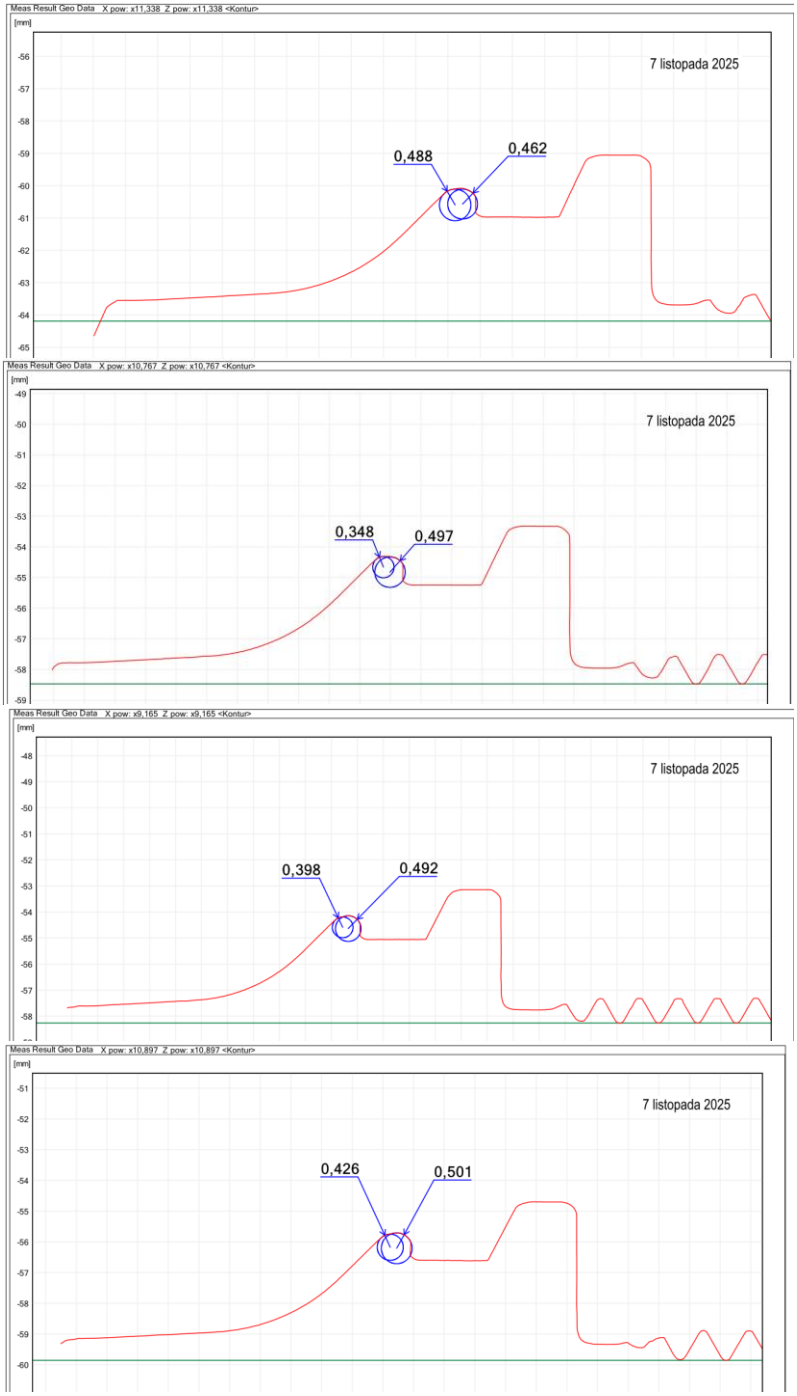
Dzięki tej zmianie uzyskano zgodność promienia z założeniami geometrycznymi i wymiarowymi wyrobu finalnego, co potwierdzają zdjęcia z projektora oraz profilografu przedstawione na rys. 8.3.4. – rys.8.3.6. Tym samym zmniejszono ryzyko niedokształtowania materiału w tym obszarze, co bezpośrednio przekłada się na obniżenie ryzyka utraty spójności materiału elastycznego (osłony gumowej) współpracującego ze śrubą podczas eksploatacji.



Rys. 8.3.4. Kształt łba spęczki finalnej po dodatkowej modyfikacji procesu walcowania



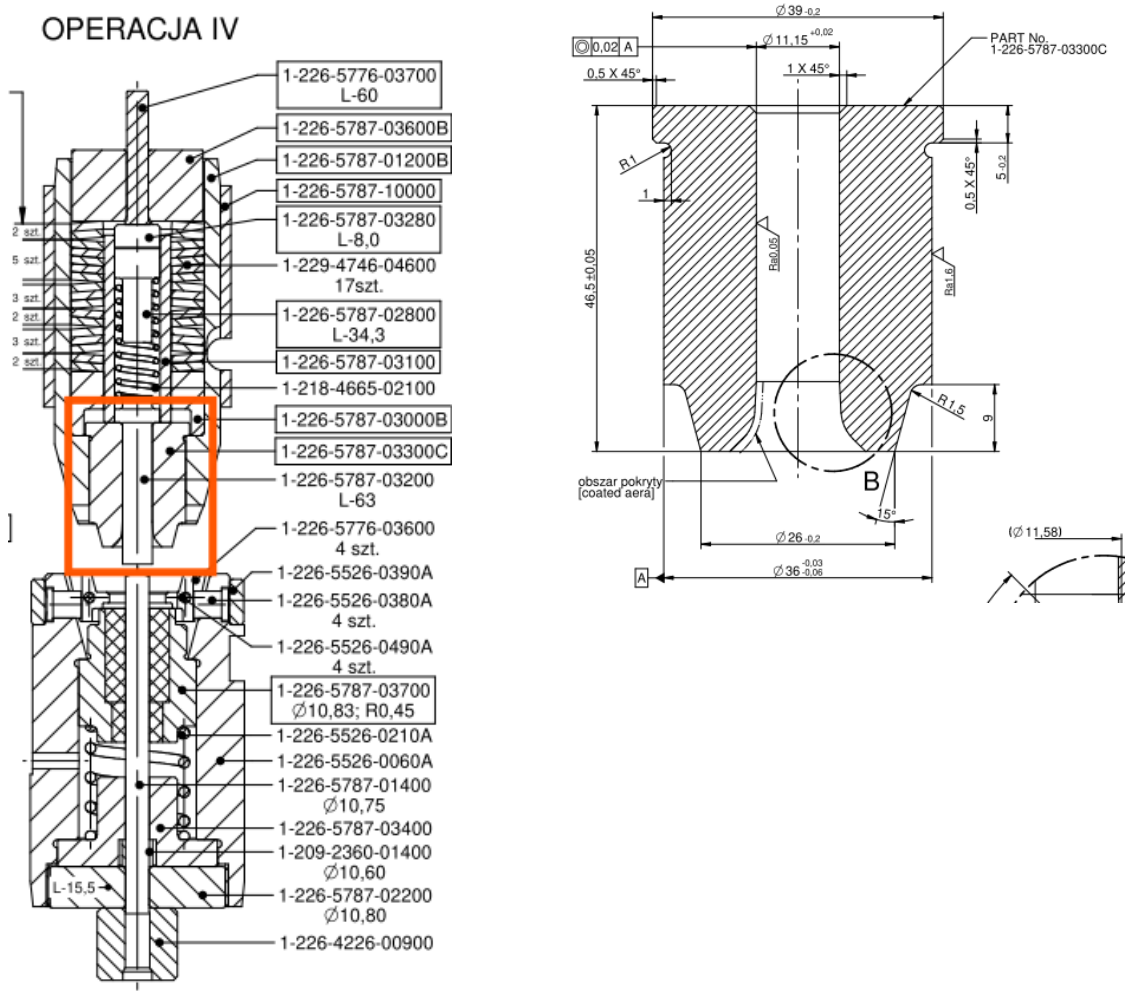
Rys. 8.3.5. Zdjęcie zarysu promieni po dodatkowej modyfikacji procesu walcowania



Rys. 8.3.6. Zarys łba po dodatkowej operacji walcowania promienia w czterech punktach dwóch płaszczyzn przekroju

8.4. Zużycie narzędzia podtrzymującego wstępnie uformowany łeb śruby

W trakcie prób przeprowadzonych w wariancie drugim zaobserwowano nadmierne zużycie tulejki podtrzymującej łeb śruby w operacji IV. Element ten, pokazany na rys. 8.4.1., został wykonany z materiału VANADIS EXTRA [58]. Jego pierwotny kształt (zaprezentowany na rys. 8.4.2.) umożliwiał wykucie jedynie około 100 sztuk śrub, co należy uznać za całkowicie nieakceptowalne i nieopłacalne w warunkach produkcji seryjnej. Z tego względu podjęto prace nad modyfikacją zarówno kształtu, jak i sposobu wykończenia tulejki. Wraz ze zwiększeniem gabarytów tulejki obserwowano systematyczny wzrost trwałości narzędzia, a tym samym wydajności procesu, co zostało przedstawione na rys. 8.4.2. W drugiej wersji konstrukcyjnej uzyskano trwałość na poziomie około 10 000 sztuk śrub, natomiast w trzeciej - finalnej - trwałość wyniosła około 100 000 sztuk. Wynik ten uznano za spełniający zarówno oczekiwania przedsiębiorstwa produkcyjnego, jak i przyjęte założenia projektowe dotyczące kosztów wytwarzania. Wzrost trwałości tulejki osiągnięto nie tylko dzięki modyfikacji jej kształtu, lecz także w wyniku zastosowania dodatkowej ochronnej powłoki typu PVD, naniesionej na powierzchnie robocze narzędzia (rys. 8.4.2.).



Rys. 8.4.1. a) Zestaw narzędzi technologii kucia ŚLS– operacja IV z zaznaczeniem tulejki;
b) rysunek techniczny tulejki



Rys. 8.4.2. Kolejne modyfikacje kształtu tulejki w celu zwiększenia jej żywotności

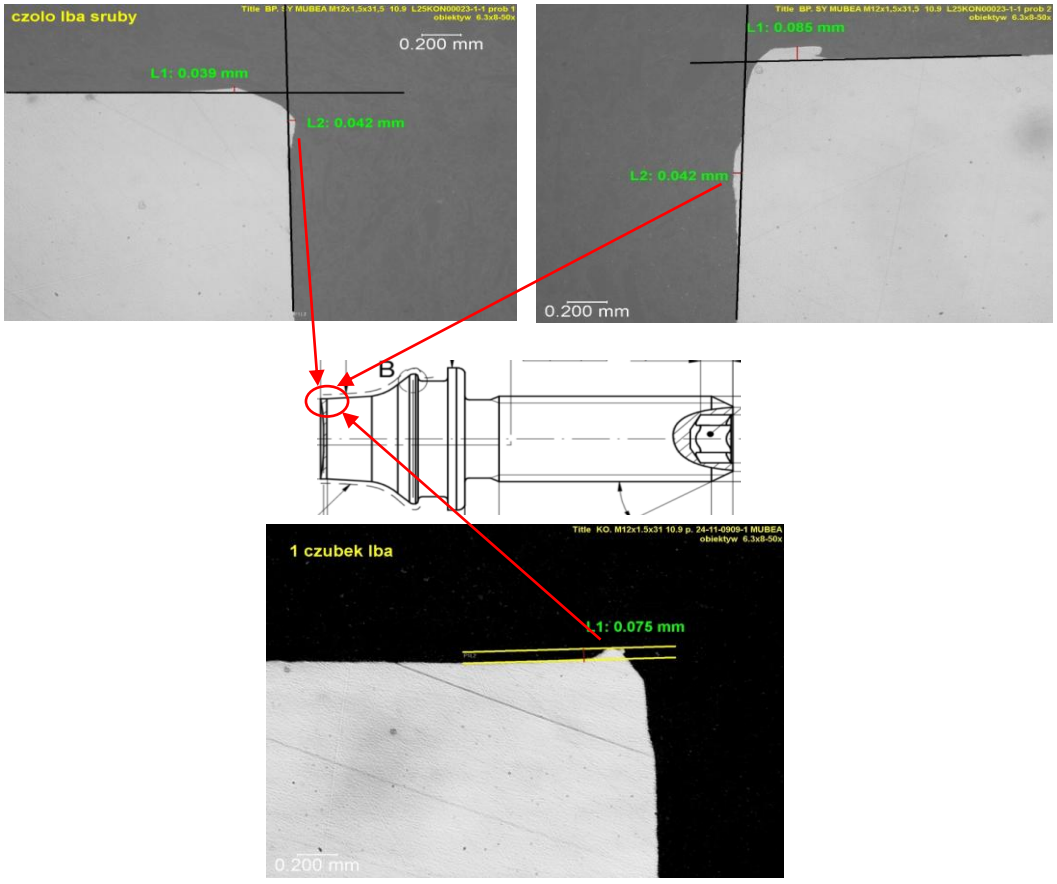
Materiał, VANADIS 4 EXTRA [58] o twardości w zakresie 60-62 HRC, z którego wykonane zostały tulejki to nowoczesna stal narzędziowa wykonana w technologii proszkowej, zaprojektowana dla wymagających zastosowań do pracy na zimno, gwarantująca nie tylko bardzo wysokie zużycie ale również odporność na pęknie. Materiał ten charakteryzuje się również bardzo dobrą kombinacją odporności na zużycie ścierne i adhezyjne oraz dobrą udarnością i stabilnością wymiarową. Dzięki technologii metalurgii proszków narzędzia wykonane z tej stali cechują się jednorodną mikrostrukturą, co minimalizuje ryzyko pęknięć i mikroporów. W celu zwiększenia odporności na zużycie ścierne i adhezyjne, miejsce kontaktu wstępnie uformowanego łba śruby z tulejką pokryto powłoką azotkową na bazie aluminium i chromu AlCrN. Powłoka ta charakteryzuje się wysoką twardością (ok. 3000 HV), bardzo dobrą przyczepnością do podłoża oraz odpornością na utlenianie i działanie wysokich temperatur (do ok. 1100 °C). Dzięki tworzeniu na powierzchni stabilnej warstwy tlenków (Al_2O_3 i Cr_2O_3) w trakcie pracy, powłoka ta skutecznie ogranicza degradację cieplną narzędzi, co znacząco wydłuża ich trwałość eksploatacyjną [59].

8.5. Inne aspekty technologiczne stanowiące wyzwania pracy badawczej

Ze względu na złożoność procesu produkcyjnego, opisaną w rozdziale 1, trudności wytwórcze, które wystąpiły w trakcie opracowywania technologii wytwarzania ŚŁS, podzielono na dwie kategorie: trudności dotyczące materiału oraz funkcjonalności śruby. Do pierwszej kategorii zaliczono defekty materiałowe i technologiczne, takie jak: wypływki, niewypełnienia, odwęglenie, nawęglenie oraz obecność fosforanów w warstwie smarnej materiału wejściowego. Drugą kategorię stanowiły niezgodności dotyczące odporności korozyjnej, uszkodzeń mechanicznych oraz nadmiernej ilości powłoki ochronnej w obszarze gwintu. W niniejszym rozdziale opisano wymienione powyżej trudności, w celu zwrócenia uwagi na inne aspekty technologiczne, które wymagały poprawy, w toku postępowania pracy badawczej i ustalania poprawnej technologii ŚŁS.

8.5.1. Trudności wytwórcze dotyczące materiału śruby

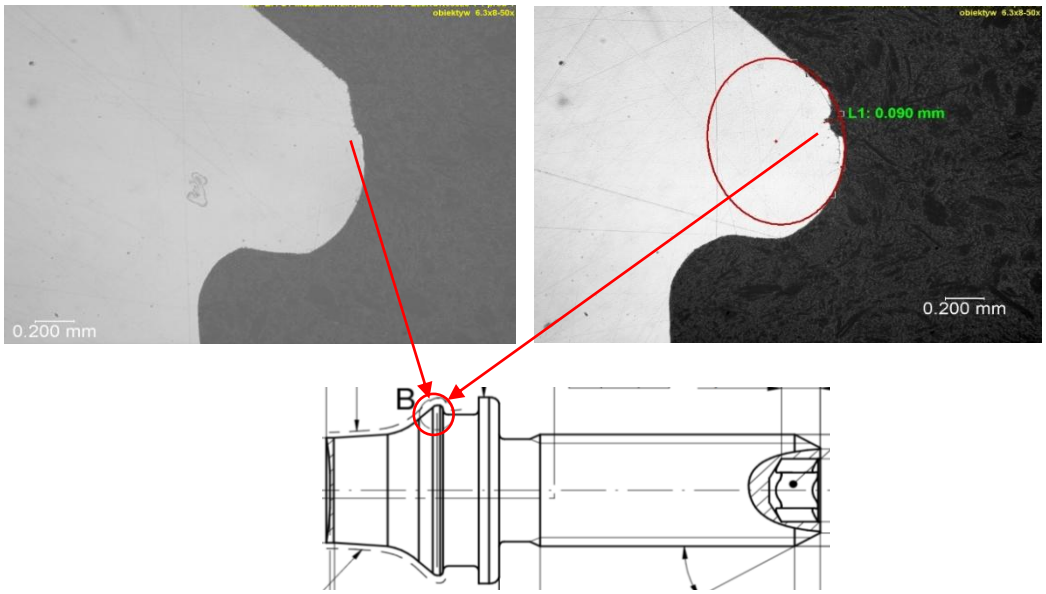
Podczas analizy wyników prób technologicznych stwierdzono występowanie wad niespójności materiału na powierzchni czołowej i bocznej łba (górna część łba – rys. 8.5.1.1.) W toku przeprowadzonej analizy przebiegu procesu wytwarzania stwierdzono, że potencjalnym źródłem powstałych wad były nieprawidłowości występujące w operacji ucinania odcinka drutu, realizowanej na samym początku procesu kucia. Nieciągłości tego rodzaju wyeliminowano poprzez korektę parametrów ustawienia narzędzi tnących w operacji wstępnej.



Rys. 8.5.1.1. Zdjęcia obrazujące wypływki materiału na powierzchni czołowej oraz bocznej czoła ŚŁS (powiększenie 50x)

W trakcie analizy mikroskopowej ujawniono również niewypełnienie kołnierza górnego, zaprezentowane na rys. 8.5.1.2, spowodowane występowaniem lokalnych zaburzeń płynięcia materiału związanych z warunkami odkształcania. Niewypełnienie górnego kołnierza na poziomie 0,1 mm nie stanowi podstawy do odrzucenia partii

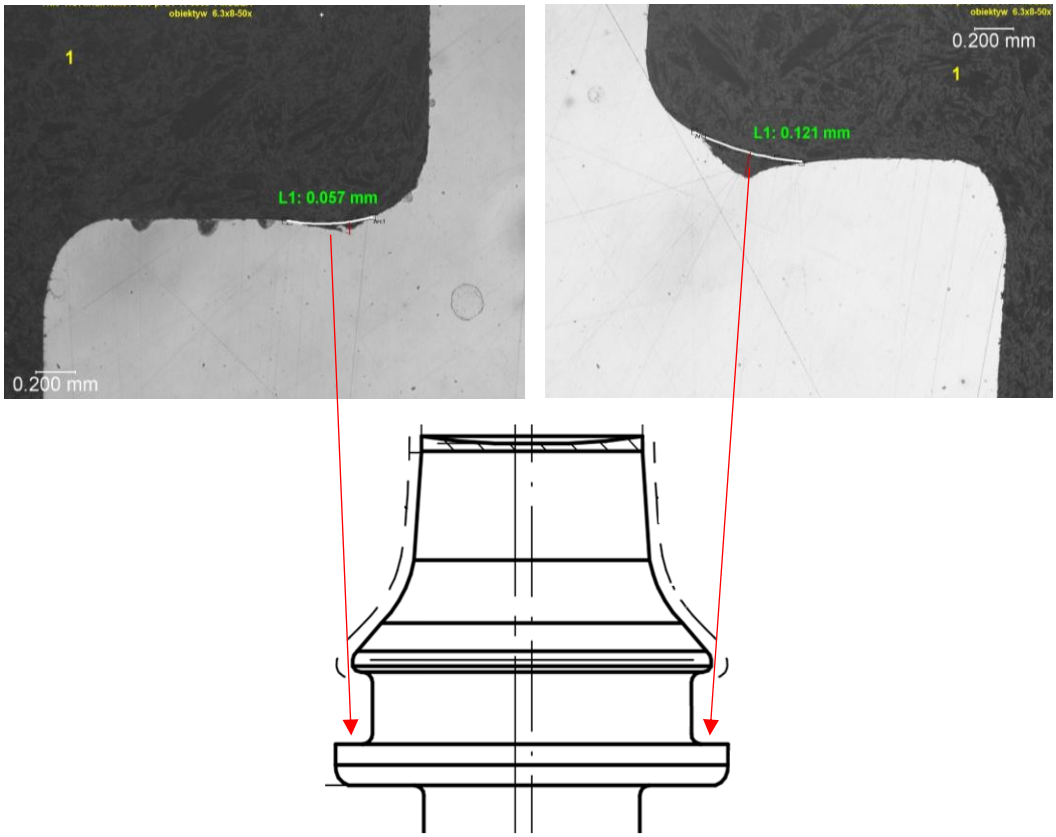
wyrobów, ze względu na brak istotnego wpływu na funkcjonalność elementu. Niemniej jednak niezgodności tego typu wymagają systematycznej kontroli oraz nadzoru w trakcie procesu technologicznego. W analizowanym przypadku, przyczyną niewypełnienia górnego kołnierza była niesymetryczność spęczki w drugiej operacji kucia, co skutkowało nierównomiernym płynięciem materiału w kierunku obrzeża jednej strony kołnierza.



Rys. 8.5.1.2. Zdjęcie mikroskopowe obrazujące niewypełnienie górnej części kołnierza łba ŚŁS (powiększenie 50x)

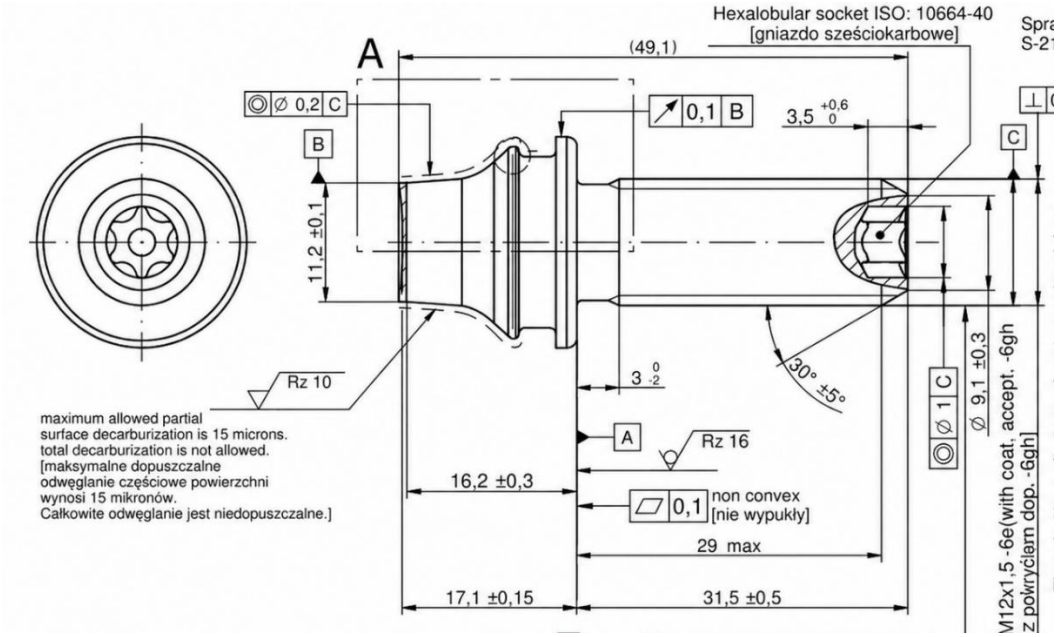
Dalsza analiza mikroskopowa ujawniła również niewypełnienia w górnej części dolnego kołnierza łba śruby, przedstawione na rys. 8.5.1.3. Analogicznie do niezgodności zidentyfikowanych w kołnierzu górnym, obserwowane niewypełnienia nie stanowią podstawy do odrzucenia partii wyrobów, o ile mieszczą się w granicach tolerancji określonych w dokumentacji technicznej oraz uzgodnieniach z odbiorcą końcowym.

Przyczyną niewypełnienia górnej części dolnego kołnierza było lokalne zaburzenie przepływu materiału w operacji trzeciej, na skutek zalepienia matrycy pozostałościami materiału (tzw. wiórów), co ograniczało prawidłowe płynięcie materiału.



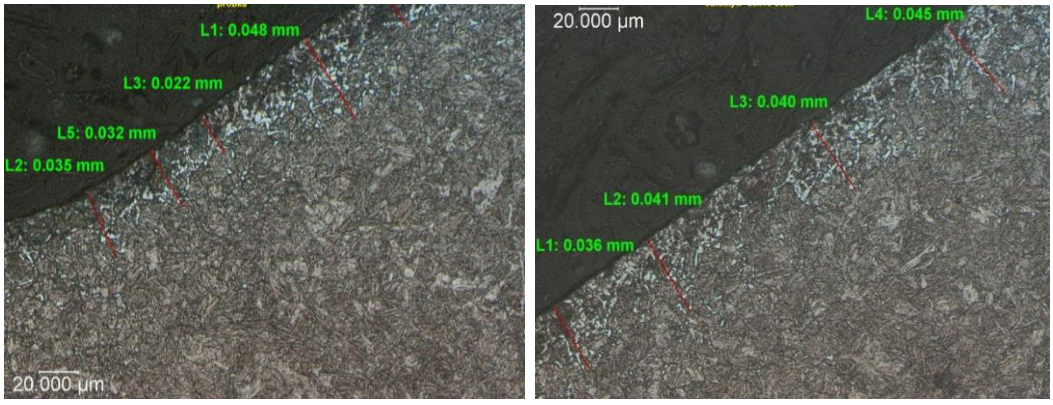
Rys. 8.5.1.3. Zdjęcie mikroskopowe obrazujące niewypełnienie górnej powierzchni dolnego kołnierza łba ŚŁS (powiększenie 50x)

Do tej grupy defektów zaliczono również uwidocznione podczas analizy mikroskopowej odwęglenia. Zgodnie z fragmentem rysunku technicznego ŚŁS (rys. 8.5.1.4), powierzchnia łba powinna charakteryzować się ograniczonym stopniem odwęglenia, znacznie bardziej rygorystycznym niż wynika to z normy ISO 898-1. Zgodnie z wymaganiami technicznymi wyrobu, maksymalne odwęglenie częściowe nie powinno przekraczać wartości 15 µm.



Rys. 8.5.1.4. Fragment rysunku technicznego ŚŁS z wymaganiem maksymalnego częściowego odwęglenia powierzchni równego 15 µm.

Miejsca z widocznymi białymi strukturami (rys. 8.5.1.5) odpowiadają obszarom wzbogaconym w fosfor. Obecność fosforu sprzyja tworzeniu tzw. odwęgleń ferrytycznych, które są niebezpieczne ze względu na zwiększoną podatność materiału na pękanie. W początkowych próbach technologicznych obróbki cieplnej ŚŁS uzyskiwane wyniki pomiaru odwęglenia przekraczały dopuszczalną wartość 15 µm, co ilustruje rys. 8.5.1.5. Otrzymywane wartości odwęglenia wahały się w zakresie od około 22 µm do 48 µm.

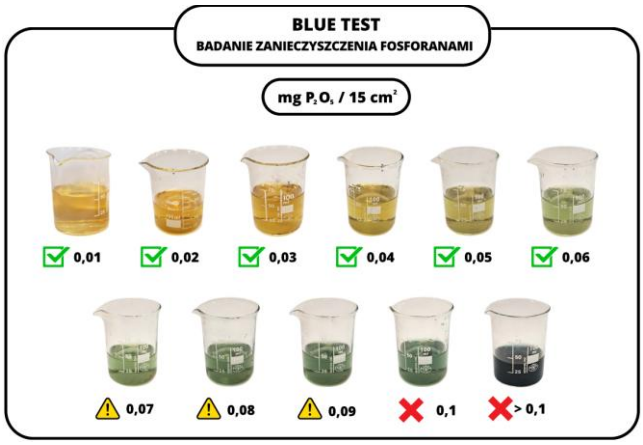


Rys. 8.5.1.5. Zdjęcia mikrostruktury w obszarze łba ŚŁS przedstawiające pomiar odwęglenia, które przekracza wymaganie max. 15µm (powiększenie 50x)

Wymóg maksymalnego odwęglenia wynoszącego 15 µm jest bardzo restrykcyjny dla elementów złącznych, szczególnie w przypadku tak skomplikowanej geometrii łba.

Aby wymóg ten mógł zostać spełniony, proces technologiczny musi zostać odpowiednio zaprojektowany. W etapie przygotowawczym należy właściwie dobrać materiał do kucia, tak aby wierzchnia warstwa środka smarnego umożliwiała redukcję średnicy walcówki w procesie ciągnienia, a jednocześnie była możliwa do usunięcia w procesie mycia przed procesem obróbki cieplnej, bądź nie wprowadzała do procesu fosforu. Obecność fosforu w procesie obróbki cieplnej stali wywiera negatywny wpływ na mikrostrukturę. Parametry procesu obróbki cieplnej muszą być odpowiednio dobrane i utrzymywane w sposób stabilny. Istotnym czynnikiem jest skuteczność usuwania warstwy fosforanów w procesie mycia poprzedzającym hartowanie. W przypadku, gdy obrabiana stal pokryta jest warstwą fosforanu cynku (końcowy etap przygotowania walcówki), warstwa ta musi zostać całkowicie usunięta przed rozpoczęciem hartowania. Skuteczność procesu mycia jest monitorowana dwiema metodami: pośrednią oraz bezpośrednią.

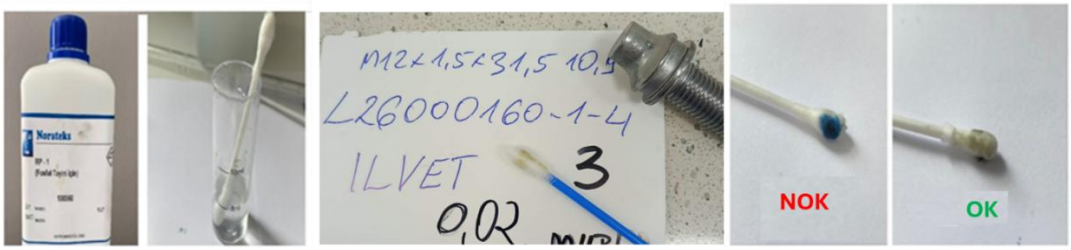
Metoda pośrednia (ilościowa) polega na pobraniu śruby po zakończeniu procesu mycia, wygotowaniu jej w odpowiednim roztworze chemicznym przez określony czas oraz porównaniu koloru uzyskanego roztworu z wzorcem kolorystycznym. Jeżeli barwa roztworu mieści się w zadanej tolerancji (rys. 8.5.1.6.), proces mycia uznaje się za skuteczny. W przeciwnym przypadku należy powtórzyć proces usuwania fosforanów, modyfikując parametry kąpieli lub wymieniając kąpiel myjącą na nową.



Rys. 8.5.1.6. Ilościowa weryfikacja skuteczności procesu usuwania fosforanów

Metoda bezpośrednia polega na pocieraniu powierzchni śruby patyczkiem nasączonym odpowiednim odczynnikiem chemicznym. Brak obecności fosforanów na pocieranej powierzchni skutkuje pozostaniem patyczka

w odcieniach żółtych. Natomiast wykrycie fosforanów powoduje zmianę koloru patyczka na niebieski, co przedstawiono na rys. 8.5.1.7.



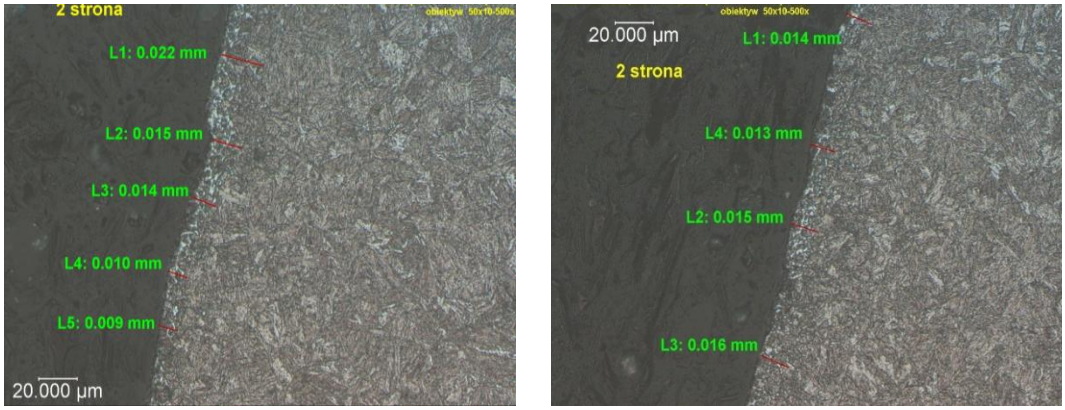
Rys. 8.5.1.7. Metoda bezpośrednia oceny skuteczności usuwania fosforanów na ŚLS

Ciekawą metodę badawczą w odniesieniu do badania przyczepności warstwy fosforanu zaproponowali autorzy w pracy [60]. Niestety posiada ona ograniczenia w postaci wpływu parametrów wejściowych takich jak średnica walcówki czy siła nacisku, co czyni ją niestandardową metodą, trudną do wdrożenia w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

Głównym czynnikiem bezpośrednio wpływającym na powstawanie odwęglenia, czyli powstawanie miejsc zubożonych w węgiel, jest potencjał węglowy (potencjał węglowy atmosfery nawęglającej to zdolność atmosfery w piecu do dostarczania węgla do powierzchni stali). W zależności od wielkości potencjału węglowego można prowadzić proces obróbki cieplnej stali w atmosferze nawęglającej, obojętnej bądź odwęglającej. W przypadku gdy potencjał węglowy pieca jest wyższy niż zawartość węgla w materiale obrabianym cieplnie dochodzi do nawęglenia powierzchni stali na skutek nasycenia warstwy powierzchniowej w węgiel. W początkowym etapie dochodzi do absorbcji węgla a następnie do jego przenikania w głąb materiału. Natomiast w przypadku gdy zawartość węgla w atmosferze pieca jest niższa niż zawartość węgla w obrabianym cieplnie materiale, wówczas dochodzi do zubożenia warstwy materiału w węgiel. Warstwy odwęglone cechują się niższą twardością powierzchni w stosunku do warstw nawęglonych. Prawidłowo prowadzony proces hartowania i odpuszczania powinien przebiegać w atmosferze obojętnej, w której zawartość węgla w atmosferze jest równa zawartości węgla w materiale obrabianym.

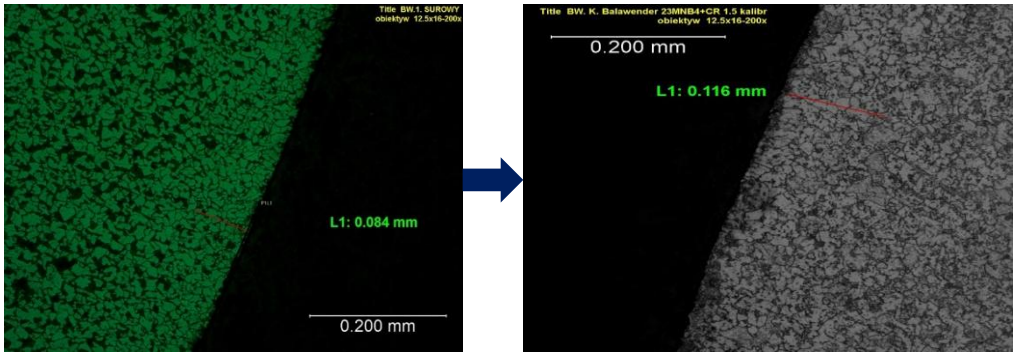
Jak przedstawiono na rys. 8.5.1.8. wymaganie maksymalnego odwęglenia częściowego 15 µm to jest możliwe do spełnienia. W analizowanym przypadku otrzymano punktowe odwęglenie w zakresie od około 9 µm do 22 µm, uzyskana średnia wartość odwęglenia wynosiła 14 µm. Zgodne wyniki uzyskano w toku prób technologicznych, przy zastosowaniu różnych kombinacji parametrów procesu obróbki cieplnej, w połączeniu

z prawidłową kontrolą skuteczności usuwania fosforanów. Analiza wykazała, że kluczowe znaczenie dla spełnienia wymagań dotyczących maksymalnego odwęglenia miały przede wszystkim: prawidłowe usunięcie warstwy fosforanów w procesie mycia przed hartowaniem oraz parametry obróbki cieplnej takie jak potencjał węglowy czy ilość załadunku na taśmie.



Rys. 8.5.1.8. Zdjęcia mikrostruktury w obszarze łba śruby przedstawiające pomiar odwęglenia, które spełnia wymaganie max. 15µm

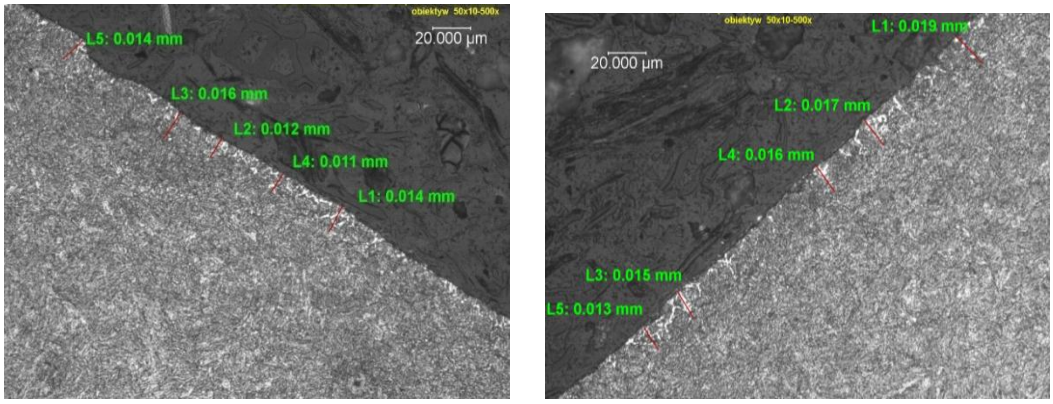
Do powyższych czynników wpływających na ostateczny wynik odwęglenia łba śruby, należy dodać stopień odwęglenia materiału po procesie żarzenia. W celu oceny tego parametru dokonano analizy porównawczej odwęglenia na materiale wejściowym (walcówka w stanie surowym) oraz odwęglenia na materiale ciągnionym w stanie żarzonym. Wyniki zaprezentowano na rys. 8.5.1.9. Wielkość odwęglenia po procesie żarzenia zwiększyła się z 8 µm do 11 µm, co oznacza wzrost o 3 µm. Zmiana ta jest stosunkowo niewielka i nie powinna w istotny sposób negatywnie wpływać na końcową wartość odwęglenia przy prawidłowo prowadzonym procesie hartowania i odpuszczania.



Rys. 8.5.1.9. Porównanie stopnia odwęglenia materiału 23MnB4 w stanie surowym w stosunku do odwęglenia materiału po procesie żarzenia

Należy jednak zaznaczyć, że ocena tego parametru ma charakter przybliżony, ponieważ nie ma możliwości jednoznacznego przyporządkowania i porównania tego samego miejsca na walcówce z odpowiadającym mu miejscem na śrubie.

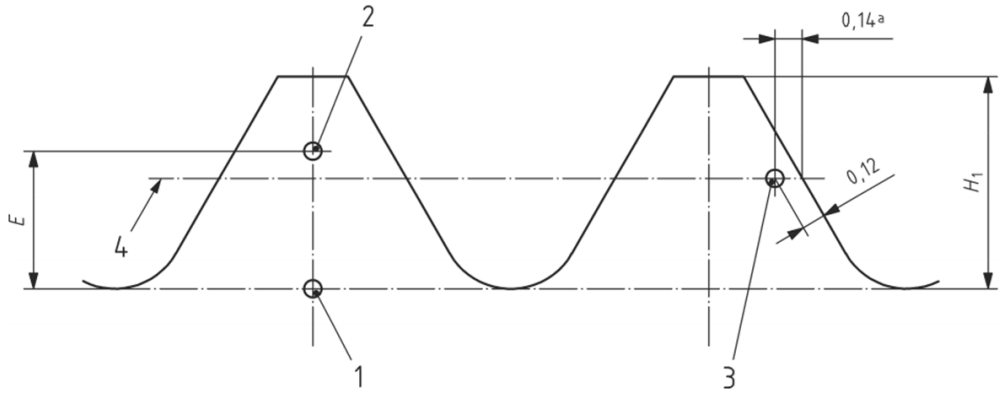
W celu określenia charakteru wpływu potencjału węglowego na wielkość odwęglenia przeprowadzono próby technologiczne, w trakcie których zwiększono potencjał węglowy atmosfery. Działanie to miało na celu przeprowadzenie kontrolowanego procesu nawęglania oraz ocenę jego skuteczności. Analizując wyniki przedstawione na rys. 8.5.1.10, można stwierdzić, że celowe nawęglenie powierzchni przyniosło pozytywny efekt w newralgicznym obszarze łba śruby. W tym miejscu wielkość stwierdzonego odwęglenia częściowego wynosiła lokalnie od 11 µm do 19 µm (rys. 8.5.1.10), natomiast uzyskana średnia wartość wyniosła 14 µm.



Rys. 8.5.1.10. Pomiar wielkości odwęglenia w newralgicznym obszarze łba po procesie obróbki cieplnej z zwiększonym potencjałem węglowym atmosfery

Pomiar odwęglenia za pomocą mikroskopu powinien zostać zweryfikowany metodą pomiaru twardości powierzchniowej HV0,3 w miejscach określonych w punkcie 9.10 normy ISO 898-1. Twardość Vickersa w punkcie pomiarowym HV(2) – położonym na wysokości strefy wolnej od odwęglenia (parametr E zgodnie z tabelą 18 zawartą w normie ISO 898-1) musi być równa lub większa od twardości w punkcie pomiarowym HV(1)- mieszczącym się u podstawy gwintu, pomniejszonej o 30 jednostek Vickersa. Punkty pomiarowe, opisane w powyższej metodzie weryfikacji odwęglenia, przedstawiono na rys. 8.5.1.11.

wymiary w podano w (mm)



Odwęglenie: HV(2) ≥ HV(1)-30
Nawęglenie: HV(3) ≤ HV(1)+30

Legenda:
E – wysokość nieodwęglonej strefy gwintu (mm)
H_1 – wysokość gwintu zewnętrznego (mm)
1, 2, 3 – punkty pomiarowe
4 – linia średnicy podziałowej gwintu
[a] – wartość 0,14 mm podano jako pomocniczą przy określaniu punktu linii średnicy podziałowej

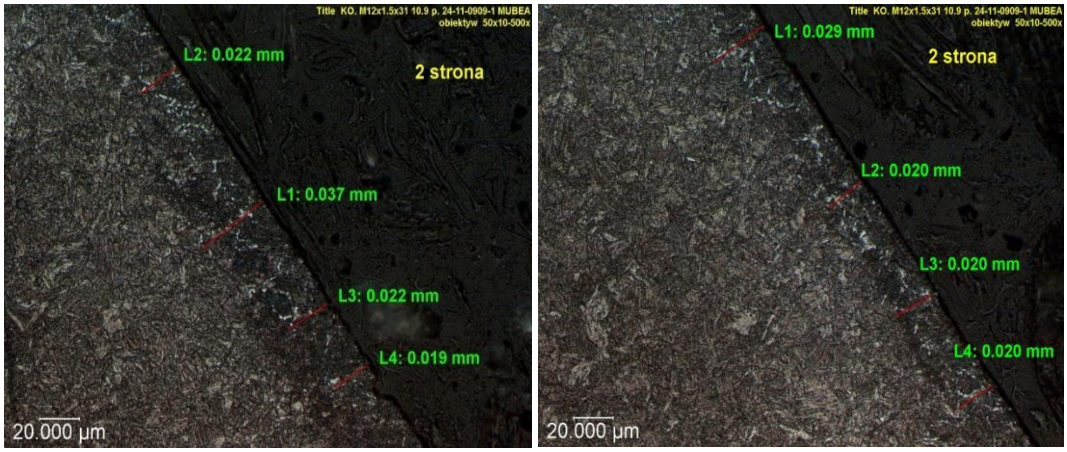
Rys. 8.5.1.11. Punkty pomiarowe dla badania twardości w celu weryfikacji odwęglenia oraz nawęglenia

W analizowanym przypadku wyniki pomiarów weryfikacji odwęglenia przedstawiono w tabeli 8.5.1. Średnie wartości pomiarów uzyskane dla pobranych próbek mieszczą się w zakresie 351 HV – 382 HV, co spełnia wymagania normy dla klasy 10.9. Dodatkowo pomiar różnicy twardości HV0,3 w punktach HV(2) i HV(1) nie przekracza 30 jednostek HV, co stanowi o zgodności wyników z wymaganiami normy a tym samym zgodności wyrobu.

Tabela 8.5.1. Wyniki pomiarów twardości HV0,3 metodą weryfikacji odwęglenia zgodnie z punktem 9.10 normy ISO 898-1 dla próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym w atmosferze o podwyższonym potencjale węglowym

Twardość powierzchniowa HV0.3:					
Próbka 1			Próbka 2		
Odległość (mm)	Twardość HV	Obciążenie (g)	Odległość (mm)	Twardość HV	Obciążenie (g)
0,0438 HV(1)	380	300	0,0438 HV(1)	379	300
0,0439 HV(1)	382	300	0,0439 HV(1)	380	300
0,0423 HV(1)	380	300	0,0423 HV(1)	386	300
0,0438 HV(1)	363	300	0,0438 HV(1)	380	300
0,0429 HV(1)	378	300	0,0429 HV(1)	380	300
0,404 HV(2)	361	300	0,404 HV(2)	369	300
0,403 HV(2)	351	300	0,403 HV(2)	352	300
0,400 HV(2)	363	300	0,400 HV(2)	354	300
0,405 HV(2)	364	300	0,405 HV(2)	352	300
0,403 HV(2)	354	300	0,403 HV(2)	350	300
Średnia HV(1):	377		Średnia HV(1):	381	
Średnia HV(2):	359		Średnia HV(2):	355	
Różnica:	**18**		**Różnica:**	**26**	

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej pobrano próbki z procesu obróbki cieplnej prowadzonej w atmosferze obojętnej i dokonano pomiaru odwęglenia za pomocą mikroskopu oraz weryfikacji odwęglenia metodą pomiaru twardości HV0,3. Wyniki przedstawiono na rys. 8.5.1.12. oraz w tabeli 8.5.2. Średnie wartości pomiarów uzyskane dla pobranych próbek mieszczą się w zakresie 334 HV – 370 HV, co podobnie jak w poprzednim przypadku, spełnia wymagania normy dla klasy 10.9. Dodatkowo pomiar różnicy twardości HV0,3 w punktach HV(2) i HV(1) również nie przekracza 30 jednostek HV, co stanowi o zgodności wyrobu. W przypadku zastosowania atmosfery obojętnej uzyskano niższe wartości twardości HV0,3 w porównaniu z atmosferą lekko nawęglającą, co można przypisać mniejszej absorpcji węgla przez podłoże.



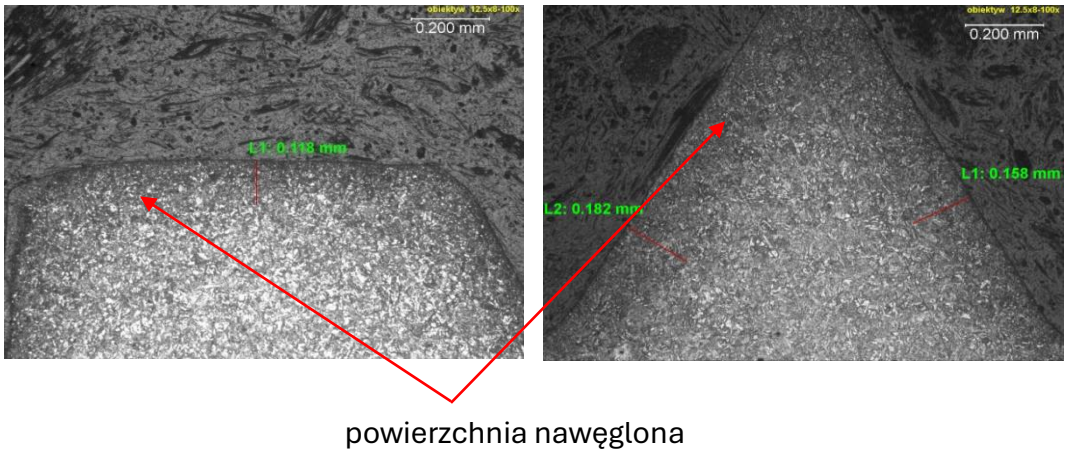
Rys. 8.5.1.12. Pomiar wielkości odwęglenia w newralgicznym obszarze łba po procesie obróbki cieplnej prowadzonej w atmosferze obojętnej

Tabela 8.5.2. Wyniki pomiarów twardości HV0,3 metodą weryfikacji odwęglenia zgodnie z punktem 9.10 normy ISO 898-1 dla próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym w atmosferze obojętnej

Twardość powierzchniowa HV0.3:					
Próbka 1			Próbka 2		
Odległość (mm)	Twardość HV	Obciążenie (g)	Odległość (mm)	Twardość HV	Obciążenie (g)
0,015 HV(1)	364	300	0,039 HV(1)	343	300
0,012 HV(1)	350	300	0,038 HV(1)	334	300
0,023 HV(1)	347	300	0,038 HV(1)	338	300
0,035 HV(1)	341	300	0,038 HV(1)	358	300
0,043 HV(1)	354	300	0,037 HV(1)	331	300
0,404 HV(2)	353	300	0,397 HV(2)	370	300
0,403 HV(2)	362	300	0,396 HV(2)	366	300
0,400 HV(2)	360	300	0,397 HV(2)	369	300
0,405 HV(2)	359	300	0,396 HV(2)	363	300
0,403 HV(2)	365	300	0,395 HV(2)	353	300
Średnia HV(1):	351		Średnia HV(1):	341	
Średnia HV(2):	360		Średnia HV(2):	364	
Różnica:	**-9**		**Różnica:**	**-23**	

Należy jednak podkreślić, że zwiększenie potencjału węglowego wpłynęło również na stan warstwy wierzchniej zakończenia śruby oraz gwintu, w których stwierdzono

występowanie strefy nawęglonej o grubości odpowiednio 11 µm oraz 15–18 µm. (rys. 8.5.1.13).



Rys. 8.5.1.13. Zdjęcia mikroskopowe obrazujące nawęgloną powierzchnię: na zakończeniu śruby oraz na gwincie (powiększenie 100x)

Warstwa wierzchnia gwintu, wzbogacona w węgiel, charakteryzuje się podwyższoną twardością powierzchniową HV0,3, co przedstawiono w tabeli 8.5.3. Średnie wartości twardości HV0,3 wyniosły 371 HV dla pierwszej próbki oraz 361 HV dla drugiej próbki. Maksymalne wartości twardości powierzchniowej w analizowanym przypadku mieściły się w zakresie 373–389 HV.

Tabela 8.5.3. Wyniki pomiarów twardości powierzchniowej na gwincie dla dwóch próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym przy zwiększonym potencjale węglowym

Twardość powierzchniowa HV0.3:					
Próbka 1			Próbka 2		
Odległość (mm)	Twardość HV	Obciążenie (g)	Odległość (mm)	Twardość HV	Obciążenie (g)
0,0634	389	300	0,0634	353	300
0,0488	389	300	0,0488	373	300
0,0877	371	300	0,0877	359	300
Średnia:	383		Średnia:	361	
Min:	371		Min:	353	
Max:	389		Max:	373	

W standardowym procesie obróbki cieplnej, prowadzonym w atmosferze obojętnej, uzyskano twardość HV0,3 na średnim poziomie około 348 HV. Maksymalne wartości twardości mieszczą się w zakresie 353–357 HV, co przedstawiono w tabeli 8.5.4.

Tabela 8.5.4. Wyniki pomiarów twardości powierzchniowej na gwincie dla dwóch próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym przy obojętnym potencjale węglowym

Twardość powierzchniowa HV0.3:					
Próbka 1			Próbka 2		
Odległość (mm)	Twardość HV	Obciążenie (g)	Odległość (mm)	Twardość HV	Obciążenie (g)
0,0294	353	300	0,0877	343	300
0,0501	349	300	0,1270	357	300
0,0888	341	300	0,0883	345	300
Średnia:	348		Średnia:	348	
Min:	341		Min:	343	
Max:	**353**		Max:	**357**	

Dokonano również weryfikacji nawęglenia za pomocą metody opartej na ISO 898-1 punkt 9.11. Metoda weryfikacji obecności nawęglenia warstwy gwintu opiera się na porównaniu wartości twardości Vickersa w wyznaczonych punktach pomiarowych (zgodnie z rys. 8.5.1.11). Pomiar twardości przeprowadzono w punktach oznaczonych jako HV(1) – podstawa gwintu oraz HV(3) – odległość 0,12 mm od powierzchni zewnętrznej

gwintu. Zgodnie z przyjętymi kryteriami oceny, wartość twardości w punkcie pomiarowym HV(3) co najmniej o 30 jednostek Vickersa większa od wartości zmierzonej w punkcie HV(1). Spełnienie tego warunku wskazuje na występowanie nawęglenia w warstwie powierzchniowej gwintu. Kryterium to stanowi podstawę do identyfikacji obecności warstwy wzbogaconej w węgiel.

Dla próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym w warunkach atmosfery lekko nawęglającej, uzyskano wyniki HV0,3 w miejscu podstawy gwintu w zakresie 349 – 363 HV, natomiast w odległości 0,12 mm od powierzchni zewnętrznej gwintu uzyskano wyniki w zakresie 365 – 387 HV (tabela 8.5.5.). Otrzymane wyniki są zgodne z warunkami zawartymi w normie ISO 898-1, która podaje maksymalną wartość twardości powierzchniowej gwintu dla klasy 10.9 równą 390 HV. Również różnica pomiędzy wynikami uzyskanymi w punkcie HV(1) oraz HV(3) nie przekracza 30HV, co świadczy o zgodności wyrobu z wymaganiami normy pomimo obecności warstwy nawęglonej.

Tabela 8.5.5. Wyniki pomiaru twardości HV0,3 metodą weryfikacji nawęglenia zgodną z punktem 9.11 normy ISO 898-1, dla dwóch próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonej przy wyższym potencjale węglowym

Weryfikacja nawęglenia gwintu, twardość HV0,3		
Punkt pomiaru	Próbka 1	Próbka 2
0,12 mm HV(3)	387	365
Podstawa HV(1)	363	349
Rożnica:	24	16

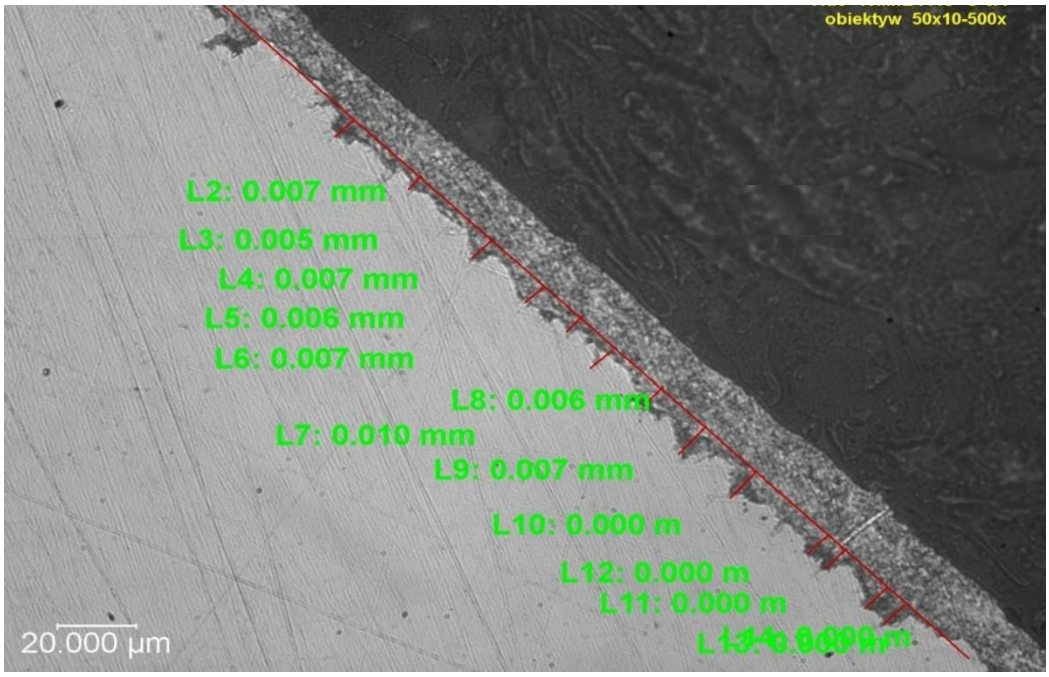
Powyższe wyniki, można porównać z wynikami zawartymi w tabeli 8.5.6, gdzie dla próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym w warunkach atmosfery obojętnej, uzyskano wyniki HV0,3 w miejscu podstawy gwintu w zakresie 355 – 366 HV, natomiast w odległości 0,12 mm od powierzchni zewnętrznej gwintu uzyskano wyniki w zakresie 355 – 358 HV . Otrzymane wyniki są zgodne z warunkami zawartymi w normie ISO 898-1. Również różnica pomiędzy wynikami uzyskanymi w punkcie HV(1) oraz HV(3) nie przekracza 30HV.

Tabela 8.5.6. Wyniki pomiaru twardości HV0,3 metodą weryfikacji nawęglenia zgodną z punktem 9.11 normy ISO 898-1, dla dwóch próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonej w warunkach atmosfery obojętnej

Weryfikacja nawęglenia gwintu, twardość HV0,3		
Punkt pomiaru	Próbka 1	Próbka 2
0,12 mm HV(3)	358	355
Podstawa HV(1)	355	366
Rożnica:	3	-11

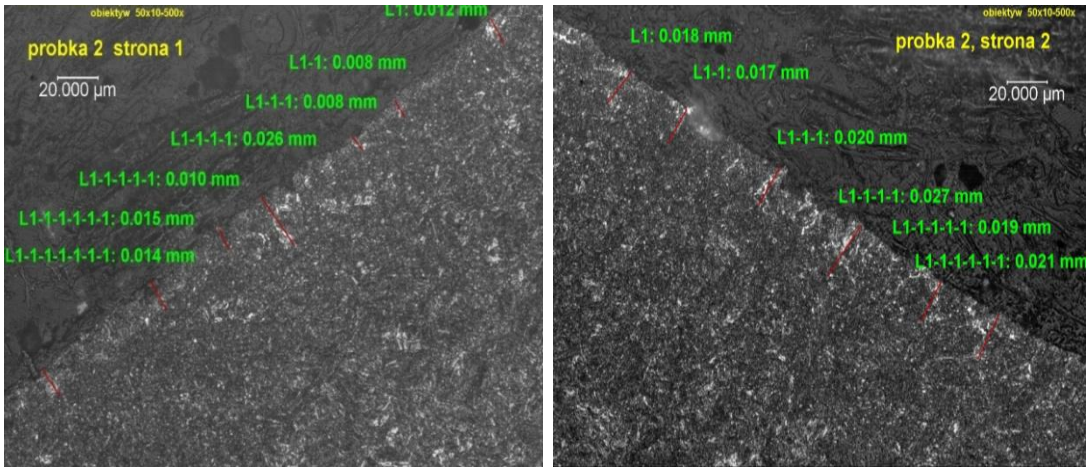
Uzyskanych wyników nie można interpretować wyłącznie jako efektu zwiększenia potencjału węglowego atmosfery. Na ich wartość wpływają również inne czynniki, takie jak pierwotny stopień odwęglenia materiału, skuteczność usunięcia warstwy fosforanu cynku, a także geometria powierzchni elementu oraz schemat jej przetwarzania podczas procesu spęczania. Górna płaszczyzna łba śruby, przeznaczona pod zgrzewanie kulki jest wielokrotnie przekształcana w procesie kucia, co powoduje kompresyjne zamknięcie podsmarnej warstwy fosforanów. Dlatego usunięcie warstwy fosforanów za pomocą procesów chemicznie staje się bardzo trudne bądź niemożliwe do wykonania z 100% skutecznością. Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie tej technologii, materiał wsadowy powinien być całkowicie pozbawiony warstwy fosforanowej, co również jest niezwykle trudne do uzyskania na skalę przemysłową.

Niemniej jednak, w celu oceny możliwości przeprowadzenia kucia i obróbki cieplnej ŚŁS wykonanej z materiału 23MnB4 z polimerową warstwą wierzchnią, pozbawioną warstwy fosforanowej, zamówiono materiał do przeprowadzenia prób technologicznych. Badania miały na celu określenie, czy zastosowanie materiału bez warstwy fosforanowej umożliwia uzyskanie wyrobu spełniającego wymaganie dotyczące maksymalnej dopuszczalnej głębokości odwęglenia, wynoszącej 15 µm. Zakładano ponadto, że w sprzyjających warunkach technologicznych poziom odwęglenia może zostać zredukowany do wartości bliskiej zeru. Zdjęcie mikroskopowe przekroju poprzecznego zakupionego materiału 23MnB4 z warstwą polimerową, w stanie żarzony + ciągniony przedstawiono na rys. 8.5.1.14. Pomimo deklaracji producenta, że materiał ten jest wolny od obecności fosforanów, w badanej próbce zdiagnozowano miejsca występowania fosforanu w wierzchniej warstwie drutu, głównie w porach (roztrawionych granicach ziaren) (rys. 8.5.1.14). Nie są to jednak wartości znaczące.



Rys. 8.5.1.14. Zdjęcie mikroskopowe przekroju poprzecznego drutu 23MnB4 w stanie żarzonym – ciągnionym, z warstwą wierzchnią polimeru (wg wytycznych bez fosforanu cynku)

Wielokrotne przetwarzanie materiału (wyciskanie i spęczanie) doprowadza do zamykania porów i uniemożliwia całkowite chemiczne usunięcie fosforanu. Wyniki przeprowadzonej próby przedstawiono na rys. 8.5.1.15. Pomimo zastosowania materiału z polimerową warstwą wierzchnią zamiast warstwy fosforanu cynku, po obróbce cieplnej w warstwie wierzchniej łba śruby stwierdzono częściowe odwęglenie. Jego wielkość wynosiła od 8 do 26 µm po jednej stronie łba próbki oraz od 17 do 27 µm po drugiej stronie.



Rys. 8.5.1.15. Zdjęcie mikrostruktury ŚLS na powierzchni newralgicznej łba obrazujące wielkość odwęglenia dla materiału 23MnB4 z polimerem

Uzyskane wartości są nieco niższe (w pomiarach punktowych) od wartości obserwowanych dla materiału 23MnB4 z warstwą wierzchnią fosforanu cynku. Niemniej jednak nie odbiegają one znacząco od wyników uzyskanych dla materiału z wierzchnią warstwą fosforanu cynku.

W związku z powyżej opisanymi aspektami wynikającymi z specyficznych wymagań klienta istotnie ważnym staje się prawidłowy proces kontrolny gwarantujący uzyskanie wiarygodnych wyników badań, stanowiących podstawę do oceny zgodności wyrobu z wymaganiami klienta. Niemniej jednak dobór odpowiedniej metody kontroli w odniesieniu do parametrów określonych na rysunku technicznym wyrobu stanowi istotne wyzwanie.

8.5.2. Trudności wytwórcze dotyczące funkcjonalności śruby łącznika stabilizatora

Ze względu na specyficzne zastosowanie ŚŁS, do powierzchni czołowej łba zgrzewana jest kulka stalowa, która nie jest pokryta powłoką ochronną. Taki element pełni rolę przegubu kulowego. Na etapie badań funkcjonalnych ŚŁS stwierdzono, że proces korozji zachodzi znacznie wcześniej, niż wynikałoby to z deklarowanych właściwości ochronnych powłoki ZnNi (typ powłoki ZNNIV SI zgodnie z normą GS 90010-1:2020) nałożonej na element (rys. 8.5.2.1).



Rys. 8.5.2.1. Zdjęcia ŚŁS po wytrzymaniu w komorze solnej podczas testów funkcjonalnych

W celu określenia przyczyn zaistnienia korozji w warunkach mgły solnej (zgodnie z normą PN-EN ISO 9227– badania odporności korozyjnej w komorach starzeniowych), wcześniej niż przed upływem 720 h, dokonano analizy testów korozyjnych oraz

sprawdzono czy partie próbne zostały wykonane w sposób gwarantujący odporność korozyjną tj. z minimalną grubością powłoki 6µm zgodnie z normą GS 90010-1:2020.

W tym celu przygotowano próbki śrub z nałożoną powłoką ochronną oraz kulką zgrzaną do powierzchni czołowej łba śruby, jak również śruby z powłoką ochronną bez zgrzanej kulki.

Tak przygotowane próbki śrub umieszczono w komorze solnej, zdolnej do wykonania testów odporności korozyjnej zgodnie z normą PN-EN ISO 9227, w następujący sposób:

A- 2 śruby z zgrzaną kulką, gdzie kulka pokryta została osłoną lateksową; umieszczone w komorze solnej kulką w górę;

B- 2 śruby z zgrzaną kulką, gdzie kulka pokryta została osłoną lateksową; umieszczone w komorze solnej kulką w dół;

C- 2 śruby bez zgrzanej kulki; umieszczone w komorze solnej łbem w górę;

Badania odporności korozyjnej przeprowadzono w komorze solnej model SF/450/CAS wg normy PN-EN ISO 9227 w temperaturze 35± 2 ^{0}C przy rozpylaniu wodnego roztworu NaCl o stężeniu 5% i liczbie pH 6,5-7,2, ciśnienie sprężonego powietrza wynosiło 70 kPa – 170 kPa.

Różny schemat ułożenia śrub w komorze miał na celu przeprowadzenie kompleksowej analizy przyczyn przedwczesnej korozyjności powłoki, wykrytej przez klienta. Przypuszczano, że źródłem korozji śruby może być korozja stalowej kulki, która następnie propaguje w kierunku gwintu elementu.

Obserwacje prowadzono w czasie dłuższym niż wymaga tego norma GS 90010-1:2020, w celu określenia rzeczywistej odporności na korozję wyrobu gotowego. Wyniki obserwacji zachowania się powłoki ochronnej w warunkach mgły solnej zaprezentowano w tabeli 8.5.2.1, gdzie symbol RC oznacza pojawienie się oznak czerwonej korozji. Obserwacji dokonywano każdego dnia, wyniki zapisywano raz w tygodniu lub w dniu pojawienia się nowej zmiany w wyglądzie próbek.

Tabela 8.5.2.1. Wyniki obserwacji ŚŁS w komorze solnej

Data	Czas (godziny)	Obserwacje próbki A	Obserwacje próbki B	Obserwacje próbki C
04.06.2025	0	Rozpoczęcie badania		
05.06.2025	24	pod osłoną na kulce powłoka zeszła; śruba OK	pod osłoną na kulce powłoka zeszła; śruba OK	OK
09.06.2025	120	na kulce RC; śruba OK	pod osłoną na kulce powłoka zeszła; śruba OK	OK
16.06.2025	288	na kulce RC; ścieka na śrubę	na kulce RC; śruba OK	OK
23.06.2025	456	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; śruba OK	OK
30.06.2025	624	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; śruba OK	OK
07.07.2025	792	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; śruba OK	OK
14.07.2025	960	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; śruba OK	OK
21.07.2025	1128	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; śruba OK	OK
24.07.2025	1200	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; 1szt. początek RC w gwincie	OK
28.07.2025	1296	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; 1szt. RC w gwincie	OK
04.08.2025	1464	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; 1szt. RC w gwincie	OK
05.08.2025	1488	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; 2szt. RC w gwincie	OK
POSTÓJ				

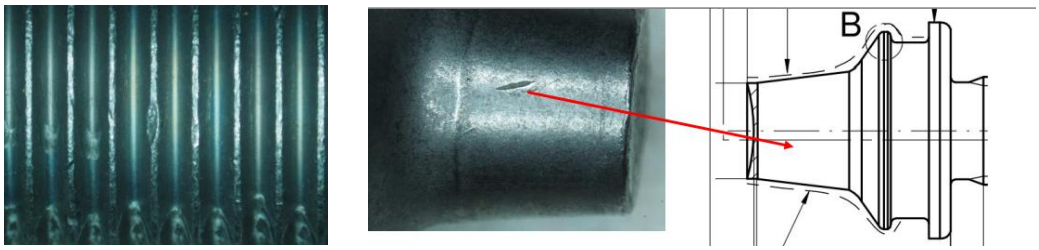
26.08.2025	1584	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; 2szt. RC w gwincie	OK
28.08.2025	1632	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; 2szt. RC w gwincie	2szt.RC w gwincie
01.09.2025	1728	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; 2szt. RC w gwincie	2szt.RC w gwincie
04.09.2025	1800	na kulce RC; na śrubie RC	na kulce RC; 2szt. RC w gwincie	2szt.RC w gwincie

Na podstawie analizy obserwacji zawartych w tabeli 8.5.2.1., można stwierdzić, że jednoznaczną przyczyną niezgodnych pod kątem odporności korozyjnej testów funkcjonalnych było ułożenie śruby z kulką w komorze solnej. Z przedstawionych obserwacji wynika, kulka zgrzana na powierzchni czołowej łba uległa korozji już w pierwszym tygodniu obserwacji (próbka A – kulka w górę), następnie rdza ściekała na gwint śruby. Dla próbki B ułożonej kulką w dół, rdza pojawiła się na kulce na początku drugiego tygodnia badania, natomiast na gwincie w ósmym tygodniu badania tj. po upływie 1200 godzin badania. Dla próbki C – śruba bez zgrzanej kulki, rdza pojawiła się po upływie 1632 godzin badania. Powyżej opisane wyniki świadczą o zgodności trwałości powłoki ochronnej z wymaganiami normy branżowej. Wygląd próbek po zakończeniu badania tj. po upływie 1800 godzin przedstawiono na rys. 8.5.2.2.



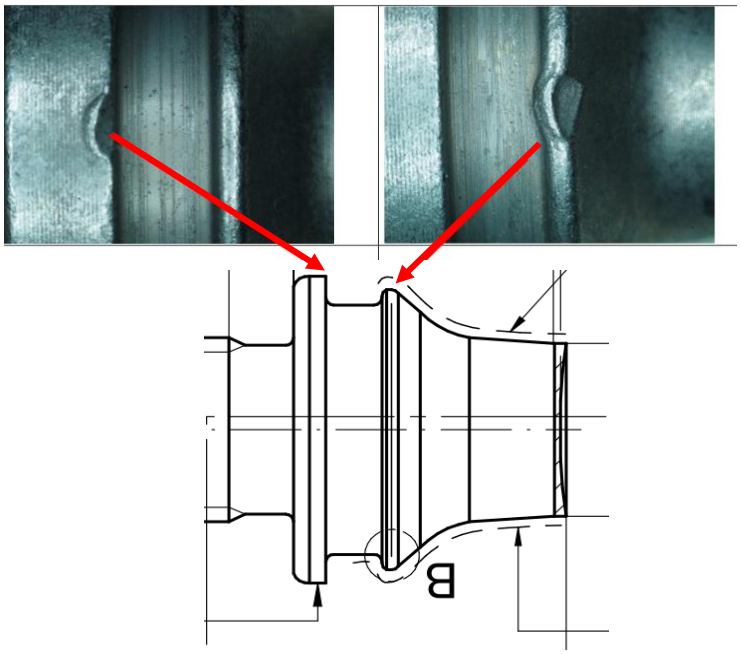
Rys. 8.5.2.2. Zdjęcia śrub po zakończeniu testów w komorze solnej – po upływie 1800 godzin

W całym procesie produkcyjnym dochodzi do licznych uszkodzeń mechanicznych elementu. Mogą to być zarówno uszkodzenia gwintu oraz uszkodzenia części stożkowej łba (rys. 8.5.2.3). Uszkodzenia mechaniczne mogą przyczyniać się do utraty funkcjonalności wyrobu np. poprzez brak montowalności gwintu, czy osłabienie odporności korozyjnej na skutek mechanicznego uszkodzenia powłoki.



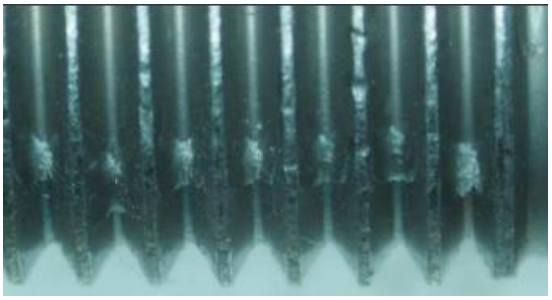
Rys. 8.5.2.3. Uszkodzenia mechaniczne; od lewej: na gwincie, na powierzchni bocznej łba

Na skutek obijania się wyrobów o siebie w toku procesu produkcyjnego, może dojść również do uszkodzeń w części przejścia powierzchni stożkowej w część cylindryczną łba (rys. 8.5.2.4). Tego typu uszkodzenia są nieakceptowalne. Stwarzają one ogromne ryzyko nadmiernego i szybkiego zużycia gumowego uszczelnienia, które jest montowane w tym obszarze.



Rys. 8.5.2.4. Uszkodzenia w obszarze przejścia stożkowej części łba w część cylindryczną

W procesie nanoszenia powłoki ochronnej, zabezpieczającej wyrób przed korozyjnym działaniem środowiska pracy, może dochodzić do nadmiernego nagromadzenia powłoki w obszarze gwintu, co może wpływać na jego właściwości funkcjonalne. Wada tego typu została zaprezentowana na rys. 8.5.2.5. W przypadku, gdy pomimo istnienia nadmiaru powłoki ochronnej w gwincie, pozostaje on nadal funkcjonalny, wada ta jest akceptowalna. O funkcjonalności gwintu świadczy badanie za pomocą sprawdzianu pierścieniowego do gwintów o tolerancji 6h (dla wyrobu gotowego).



Rys. 8.5.2.5. Nadmiar powłoki ochronnej w gwincie

Opisane problemy materiałowe i funkcjonalne mogą być skutecznie ograniczone poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu oraz ich właściwą kontrolę podczas produkcji. Zastosowanie odpowiednio dobranych metod kontroli na poszczególnych etapach procesu pozwala na bieżące wykrywanie niezgodności i ich eliminowanie, a tym samym zapewnienie spełnienia przez wyrób określonych wymagań technicznych.

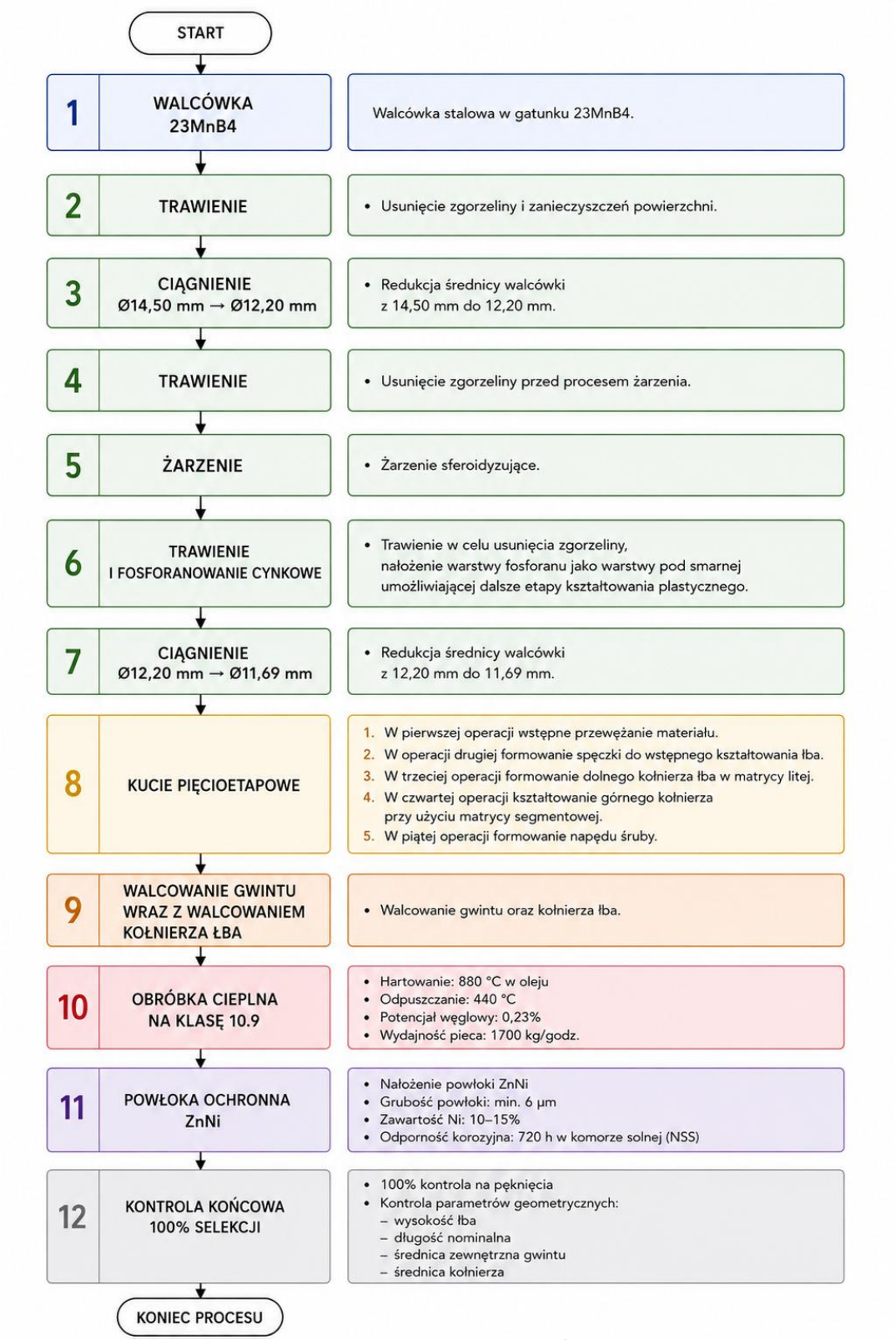
9. Opracowanie kompletnego procesu wytwórczego wraz z procesem kontrolnym

W ramach niniejszej pracy doktorskiej opracowano kompletny proces technologiczny wytwarzania śruby łącznika stabilizatora, obejmujący dobór i przygotowanie materiału, kolejne operacje kucia na zimno i walcowania kołnierza oraz gwintu, obróbkę cieplną oraz obróbkę powierzchniową. Dodatkowo opracowano proces kontroli jakości, uwzględniający kontrolę wymiarów, ocenę jakości powierzchni, badania właściwości mechanicznych oraz kontrolę powłoki antykorozyjnej na wyrobie gotowym.

9.1. Proces wytwórczy

Na podstawie przyjętych założeń konstrukcyjnych i materiałowych opracowano kompletny proces wytwórczy ŚŁS ze stali 23MnB4. Kolejność operacji ustalono tak, aby zapewnić właściwe przygotowanie materiału do kształtowania, prawidłowy przebieg kolejnych operacji technologicznych oraz uzyskanie wymaganych właściwości gotowego elementu. Proces produkcyjny zaprezentowany na rys. 9.1.1. obejmuje przygotowanie powierzchni walcówki, pierwsze ciągnienie, trawienie przed żarzeniem, żarzenie sferoidyzujące oraz ponowne przygotowanie powierzchni poprzez trawienie i fosforanowanie cynkowe. Tak przygotowany materiał jest poddawany drugiemu ciągnieniu, po którym przechodzi do operacji kucia pięcioetapowego. Podczas kucia, w pierwszych trzech operacjach formowana jest wstępna spęczka przy zastosowaniu matryc litych, natomiast w operacji czwartej zastosowana jest matryca segmentowa w celu nadania finalnego kształtu łba śruby. W operacji piątej (ostatnia operacja kucia) formowany jest napęd w trzpieniu śruby. Po kuciu wykonywane jest walcowanie gwintu wraz z walcowaniem kalibrującym kołnierza łba. Następnie śruby poddawane są obróbce cieplnej, obejmującej hartowanie i odpuszczanie, w celu uzyskania klasy właściwości mechanicznych 10.9. Ostatnim etapem technologicznym jest naniesienie powłoki ZnNi, której zadaniem jest zabezpieczenie powierzchni przed korozją oraz zapewnienie prawidłowego procesu dokręcania podczas montażu. Proces kończy 100% kontrola pęknięć oraz sprawdzenie podstawowych wymiarów geometrycznych, w tym wysokości łba, długości nominalnej, średnicy zewnętrznej gwintu i średnicy kołnierza. Przyjęta technologia pozwala na uzyskanie śruby o wymaganej geometrii, właściwościach

mechanicznych i odporności korozyjnej, przy zachowaniu odpowiedniej kontroli na poszczególnych etapach wytwarzania, opisanej w następnym punkcie.



Rys. 9.1.1. Projekt przebiegu procesu produkcyjnego ŚŁS

9.2. Proces kontrolny

Proces kontroli jakości śruby łącznika stabilizatora opracowano w taki sposób, aby kontrola wyrobu była prowadzona na wszystkich etapach procesu technologicznego. Kontroli podlega zarówno materiał wejściowy, półfabrykat oraz wyrób gotowy. Dodatkowo, do każdej kontroli wyrobu na danym etapie produkcyjnym prowadzona jest kontrola danego procesu produkcyjnego w oparciu o plany kontroli procesów, z uwzględnieniem wytycznych opisanych w poprzednich rozdziałach.

Na wejściu procesu kontrolowana jest walcówka, gdzie sprawdzane są podstawowe parametry materiału, takie jak średnica, jakość powierzchni, skład chemiczny, stopień odwęglenia oraz wytrzymałość. Dodatkowo wykonywana jest próba spęczania, pozwalająca ocenić czy w danym fragmencie materiału, pobranym do badania, występują wady materiałowe (hutnicze) mogące ujawnić się w dalszych procesach produkcyjnych. Po operacjach trawienia oceniany jest stan jakości powierzchni. Kontrola ma na celu przede wszystkim wykrycie ewentualnych wad powierzchniowych oraz sprawdzenie, czy zgorzelina została prawidłowo usunięta. Po operacji ciągnienia kontrolowana jest średnica materiału, co pozwala na weryfikację uzyskanego stopnia redukcji. Po procesie żarzenia określane są stopień odwęglenia oraz wytrzymałość materiału. Wyniki tych kontroli pozwalają ocenić, czy uzyskany stan materiału spełnia wymagania niezbędne do przeprowadzenia kolejnych operacji kształtowania plastycznego. Po kolejnym trawieniu i fosforanowaniu cynkowym kontrolowana jest jakość powierzchni oraz grubość warstwy fosforanowej. Parametry te mają bezpośredni wpływ na warunki tarcia podczas dalszych operacji kształtowania. W przypadku pięcioetapowego kucia kontrola obejmuje wszystkie wymiary i tolerancje kształtu czy położenia określone na rysunku technicznym wyrobu. Kontrolowana jest pierwsza i ostatnia sztuka z partii produkcyjnej, co umożliwia sprawdzenie prawidłowego ustawienia narzędzi oraz potwierdzenie uzyskania wymaganej geometrii elementu dla całej partii produkcyjnej. W trakcie walcowania gwintu i kołnierza łba kontrolowane są średnica zewnętrzna gwintu, nakręcalność na sprawdzian pierścieniowy 6e oraz promień kołnierza. Kontrola tych parametrów pozwala na ocenę zgodności wyrobu z wymaganiami konstrukcyjnymi oraz potwierdzenie zdolności procesu do wytwarzania detali spełniających wymagania funkcjonalne i montażowe.

W trakcie procesu obróbki cieplnej kontrolowana jest twardość oraz wytrzymałość na rozciąganie. Wyniki tych badań służą do oceny zgodności z wymaganiami klasy 10.9 wg. normy ISO 898-1. Dodatkowo kontrolowany jest stopień

odwęglenia na łbie śruby, w celu zapewnienia funkcjonalności wyrobu podczas dalszych procesów montażowych (zgrzewanie kulki do łba śruby). Po naniesieniu powłoki ZnNi sprawdzana jest jej grubość, nakręcalność gwintu na sprawdzian pierścieniowy 6h oraz odporność korozyjna. Zastosowana powłoka ochronna pełni funkcję zabezpieczenia antykorozyjnego oraz zapewnia powtarzalność procesu montażu poprzez kontrolę współczynnika tarcia na połączeniu gwintowym. Ostatnim etapem procesu jest kontrola końcowa gotowych śrub, prowadzona w 100% w ramach selekcji mechanicznej z wykorzystaniem antywzorców. Jej celem jest wykrycie i wyeliminowanie wyrobów niezgodnych przed przekazaniem ich do dalszego obrotu. Przebieg procesu kontrolnego zaprezentowano na rys. 9.2.1.



Rys. 9.2.1. Projekt przebiegu procesu kontrolnego ŚŁS

10. Podsumowanie i wnioski

W pracy opracowano i zweryfikowano technologię wytwarzania śruby łącznika stabilizatora (ŚŁS) ze stali 23MnB4, której łeb charakteryzuje się wklęsło-wypukłym kształtem powierzchni bocznej. Głównym problemem technologicznym było określenie sposobu kształtowania łba z wykorzystaniem matrycy segmentowej oraz ustalenie kolejności operacji spęczania zapewniającej uzyskanie wymaganej geometrii wyrobu.

Przebieg procesu kształtowania analizowano z wykorzystaniem symulacji numerycznych MES, na podstawie których określono mapy odkształceń, naprężeń średnich i efektywnych oraz rozkład temperatury w materiale. Następnie wykonano wstępne próby technologiczne w celu opracowania technologii przygotowania materiału, obejmujące operacje trawienia, żarzenia i ciągnienia oraz wstępne ustalenie parametrów obróbki cieplnej.

W ramach głównych prób technologicznych przeanalizowano dwa warianty procesu, różniące się rozmieszczeniem gniazd roboczych w kuźniarce oraz kolejnością formowania kołnierza dolnego i górnego. W wariancie II, gdzie kształtowanie górnego kołnierza odbywało się w matrycy segmentowej w operacji czwartej, uzyskano prawidłowo ukształtowaną odkuwkę, jednak stwierdzono niezgodność promienia górnego kołnierza z wymaganiem konstrukcyjnym. Problem rozwiązano poprzez wprowadzenie dodatkowej operacji wygładzania górnego kołnierza podczas walcowania gwintu. Zastosowanie tej operacji pozwoliło uzyskać wymagany kształt kołnierza bez konieczności modyfikacji operacji kucia.

Następnie przeanalizowano cały proces wytwarzania ŚŁS, obejmujący przygotowanie materiału, kucie, walcowanie gwintu, obróbkę cieplną, nanoszenie powłoki ochronnej oraz kontrolę końcową. Dla poszczególnych operacji określono parametry podlegające kontroli oraz wymagania dotyczące jakości materiału i gotowego wyrobu. Przeanalizowano również niezgodności mogące wystąpić w trakcie procesu, w szczególności odwęglenie warstwy wierzchniej, uszkodzenia mechaniczne, problemy z odpornością korozyjną oraz nadmierną ilość powłoki ochronnej w obszarze gwintu.

Na podstawie przeprowadzonych prób opracowano kompletny proces technologiczny i wdrożono go do produkcji. Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość wykonania ŚŁS o wymaganej geometrii i właściwościach z wykorzystaniem kucia na zimno. Zastosowanie opracowanej technologii pozwoliło również zastąpić obróbkę skrawaniem stosowaną przy wykonywaniu prototypów procesem kucia z zastosowaniem matrycy segmentowej, co

umożliwiło zmniejszenie kosztów wytwarzania przy zachowaniu wymaganej jakości wyrobu.

Skomplikowana geometria łba wyrobu śrubowego wymaga zastosowania matryc segmentowych w celu plastycznego kształtowania na kuźniarkach. Wprowadzenie matryc segmentowych wiąże się jednak z problemami w uzyskaniu założonej dokładności wymiarowej w procesie kucia na zimno, szczególnie w obszarze promieni zaokrąglenia krawędzi na powierzchni bocznej łba. Kształt łba, mający istotne znaczenie dla właściwości użytkowych wyrobu, można kontrolować poprzez modyfikację geometrii matryc segmentowych, zmianę kolejności ich osadzenia w matrycy kuźniarki (tj. zmianę kolejności operacji) oraz poprzez zastosowanie dodatkowego wygładzania promienia w procesie walcowania. W kuciu na zimno w produkcji wielkoseryjnej, oprócz parametrów jakościowych wytwarzanych elementów, istotnym czynnikiem decydującym o rentowności procesu jest zużycie narzędzi. Odpowiednia optymalizacja ich geometrii może znacząco zwiększyć wydajność i zmniejszyć koszty produkcji.

W wyniku przeprowadzonych badań i prób technologicznych można sformułować następujące wnioski szczegółowe:

1. Zastosowanie matrycy segmentowej umożliwia wykonanie wklęsło-wypukłego kształtu łba ŚŁS w procesie kucia na zimno.
2. Kolejność operacji spęczania oraz rozmieszczenie gniazd roboczych w kuźniarce wpływają na sposób przepływu materiału i końcową geometrię łba śruby.
3. Prawidłowo ukształtowaną odkuwkę uzyskano w wyniku przeprowadzenia prób technologicznych (wariant II), gdy zastosowano matrycę segmentową w operacji czwartej do kształtowania górnego kołnierza łba śruby łącznika stabilizatora, jednak nie uzyskano dokładnego równomiernego promienia na obwodzie górnego kołnierza.
4. Wprowadzenie operacji wygładzania górnego kołnierza podczas walcowania gwintu pozwoliło uzyskać wymagany promień.
5. Zastosowanie odpowiednich parametrów obróbki cieplnej oraz kontrola stanu warstwy wierzchniej pozwalają ograniczyć występowanie niezgodności związanych z odwęgleniem i nawęgleniem.

6. Kontrola materiału wejściowego, parametrów procesu oraz gotowego wyrobu umożliwia wykrywanie niezgodności mogących wpływać na właściwości funkcjonalne ŚŁS.
7. Problemy związane z geometrią, stanem powierzchni, odpornością korozyjną i funkcjonalnością gwintu mogą być ograniczone poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu oraz zastosowanie kontroli na poszczególnych etapach produkcji.
8. Opracowana technologia została wdrożona do produkcji ŚŁS ze stali 23MnB4 i umożliwiła zastąpienie obróbki skrawaniem stosowanej przy wykonywaniu prototypów procesem kucia na zimno z zastosowaniem matryc segmentowych.
9. Zastosowanie opracowanej technologii pozwoliło na zmniejszenie kosztów wytwarzania przy zachowaniu wymaganej geometrii, jakości i właściwości funkcjonalnych gotowego wyrobu.

Literatura

[1] Koelner Rawlplug IP, „Źródło własne," 2025.
[2] J. Sińczak, Ed., J. Łuksza, J. Sińczak, P. Bała, S. Bednarek, A. Bunsch, T. Kenig, J. Kowalska, J. Krawczyk, A. Łukaszek-Sołek, M. Paćko, T. Skowronek, P. Skubisz, T. Śleboda, M. Witkowska, M. Wojtaszek, K. Celadyn, and P. Chyła, *Zaawansowane technologie kucia materiałów wysokotopliwych*. Kraków: ARBOR FP, 2013
[3] Rainbow Technology, „What is Cold Forging? Cold Forging Process, Materials, Uses, Advantages, Disadvantages," [Online]. Available: https://www.fastenerequipmentsupplier.com/pl/news/What-is-Cold-Forging--Cold-Forging-Process-Materials-Uses-Advantages-Disadvantages.html. [Accessed: Jan. 4, 2026].
[4] Ridhi, „Understanding cold forging benefits for automotive fasteners," 2025. [Online]. Available: https://www.ridhifasteners.in/understanding-cold-forging-benefits-for-automotive-fasteners. [Accessed: Jan. 4, 2026].
[5] Radomski Klaster Metalowy, [Online]. Available: https://klastermetalowy.radom.pl/skarbnica-wiedzy/lorem-ipsum-dolor-sit-amet-consetetur-sadipscing-elitr-sed-diam-nonumy-eirmod-tempor-invidunt-ut-labore-et-dolore-2. [Accessed: Jan. 4, 2026].
[6] C.-C. Yang and C.-H. Liu, „The Study of Multi-Stage Cold Forming Process for the Manufacture of Relief Valve Regulating Nuts," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 10, Art. no. 6299, 2023.
[7] A. R. Jo, M. S. Jeong, S. K. Lee, Y. H. Moon, and S. K. Hwang, „Multi-Stage Cold Forging Process for Manufacturing a High-Strength One-Body Input Shaft," *Materials*, vol. 14, no. 3, Art. no. 532, 2021.
[8] E. S. Reshetnikova, D. U. Usatiy, and T. V. Usataya, „Bolts Manufacturing Technology," *Solid State Phenomena*, vol. 265, pp. 79–85, 2017.
[9] M. van Til, „Production of flange bolts," *Hardware*, 2007.
[10] S. A. Litvinenko and F. A. Hasanov, „The method of manufacturing bolts with a flange," Patent RU 2222408, 2004.
[11] ALEKVS, „What is thread rolling process? Advantages and applications," [Online]. Available: https://www.alekvs.com/what-is-thread-rolling-process-advantages-and-applications. [Accessed: Jan. 4, 2026].
[12] Valley Forge & Bolt, „Threading," [Online]. Available: https://www.vfbolts.com/capabilities/threading/. [Accessed: Jan. 4, 2026].
[13] Würth Industry, „Thread rolling screws," [Online]. Available: https://www.wurth-industry.pl/web/en/wispl/products_and_quality/anwendungsspezifische_produkte_wispl/gewindefurchende_schrauben_1/threadrollingscrews_wispl.php. [Accessed: Jan. 4, 2026].
[14] XILUO, „What is a cold heading die?" [Online]. Available: https://xiluomold.com/what-is-a-cold-heading-die-2/. [Accessed: Jan. 4, 2026].
[15] QP Mechanics, „Dies," [Online]. Available: https://www.qpmechanics.com/en/products/dies. [Accessed: Jan. 5, 2026].
[16] Taiwan Metiz Alliance, „Segment nut die," [Online]. Available: https://tooling.tw/tools-segment-nut-die.html. [Accessed: Jan. 5, 2026].
[17] NETFORM, „Stripwound forging die containers," [Online]. Available: https://www.netformmetal.com/products/stripwound-forging-die-containers. [Accessed: Jan. 5, 2026].
[18] ALWOTECH, „Matryce do formowania plastycznego – charakterystyka i praktyczne wykorzystanie," [Online]. Available: https://alwotech.com/matryce-do-formowania-plastycznego-charakterystyka-i-praktyczne-wykorzystanie/. [Accessed: Jan. 5, 2026].

[19] IspatGuru, „Cold heading process," [Online]. Available: https://www.ispatguru.com/cold-heading-process/. [Accessed: Jan. 4, 2026].
[20] Y.-G. Qiu and H.-Y. Cho, „A Split Die Design for Forging of Hexagonal Bolt Head," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, vol. 19, no. 5, pp. 91–97, 2020.
[21] I. Suchy, *Handbook of Die Design*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2006.
[22] H. C. Lee, M. A. Saroosh, J. H. Song, and Y. T. Im, „The effect of shrink fitting ratios on tool life in bolt forming processes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 8, pp. 3766–3775, 2009.
[23] M. Dalbosco, G. da Silva Lopes, P. D. Schmitt, L. Pinotti, and D. Boing, „Improving fatigue life of cold forging dies by finite element analysis: A case study," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64, pp. 349–355, 2021.
[24] B. Tanrıkulu and R. Karakuzu, „Fatigue life prediction model of WC-Co cold forging dies based on experimental and numerical studies," *Engineering Failure Analysis*, vol. 118, Art. no. 104910, 2020.
[25] V. Vazquez, D. Hannan, and T. Altan, „Tool life in cold forging—an example of design improvement to increase service life," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, no. 1, pp. 90–96, 2000.
[26] Y. H. Seo, „Development of smart cold forging die life cycle management system based on real-time forging load monitoring," *Scientific Reports*, vol. 12, Art. no. 13297, 2022.
[27] S. Nosal, „Kształtowanie odporności na zacieranie adhezyjne z wykorzystaniem wybranych modeli," *Tribologia*, no. 3, pp. 121–135, 2015.
[28] M. Killmann and M. Merklein, „Fatigue testing of cold forging tools using elastomer compression," *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, vol. 72, no. 1, pp. 241–244, 2023.
[29] M. Hawryluk and B. Mrzygłód, „Analiza trwałości narzędzi kuźniczych dla różnych warunków eksploatacji z wykorzystaniem systemu wspomagania decyzji opartego o sztuczne sieci neuronowe," *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, vol. 19, no. 3, pp. 338–348, 2017.
[30] L. Cser, M. Geiger, K. Lange, J. A. G. Kals, and M. Hänsel, „Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 207, no. 4, pp. 223–239, 1993.
[31] D. Heinemeyer, „Gensekschäden und Einflussgrössen der Standmenge," *Industrieanzeiger*, vol. 100, no. 73, 1978.
[32] Z. Gronostajski and M. Hawryluk, „The main aspects of precision forging," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 39–55, 2008.
[33] *ISO 6157-3:1988, Fasteners—Surface discontinuities—Part 3: Bolts, screws and studs for special requirements*. International Organization for Standardization.
[34] J. Ma, X. Tang, Y. Hou, H. Li, J. Lin, and M. W. Fu, „Defects in metal-forming: Formation mechanism, prediction and avoidance," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 207, Art. no. 104268, 2025.
[35] W. L. Chan, M. W. Fu, J. Lu, and L. C. Chan, „Simulation-enabled study of folding defect formation and avoidance in axisymmetrical flanged components," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 11, pp. 5077–5086, 2009.
[36] J.-B. Kim, W.-S. Seo, and K. Park, „Damage prediction in the multistep forging process of subminiature screws," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 9, pp. 1619–1624, 2012.
[37] W. L. Chan, M. W. Fu, and J. Lu, „FE simulation-based folding defect prediction and avoidance in forging of axially symmetrical flanged components," *Journal of*

Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, vol. 132, no. 5, Art. no. 054502, 2010.
[38] P. F. Gao, M. Y. Fei, X. G. Yan, S. B. Wang, Y. K. Li, L. Xing, K. Wei, M. Zhan, Z. T. Zhou, and Z. Keyim, „Prediction of the folding defect in die forging: A versatile approach for three typical types of folding defects," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 39, pp. 181–191, 2019.
[39] G. G. Wang and S. Shan, „Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization," *Journal of Mechanical Design*, vol. 129, no. 4, pp. 370–380, 2007.
[40] T. Dubiel and T. Balawender, „Discontinuity defects of the bolt head bearing surface," *Engineering Failure Analysis*, vol. 136, Art. no. 106140, 2022.
[41] J.F. Heat Treating, „What is the difference between hardening and tempering of metals?" [Online]. Available: https://jfheattreatinginc.com/2023/07/what-is-the-difference-between-hardening-and-tempering-of-metals/. [Accessed: Jan. 31, 2026].
[42] H. Zhang, M. Huo, Z. Ma, H. Wu, G. Su, L. Li, T. Zhang, F. Lin, F. Chen, and Z. Jiang, „Effects of Quenching and Tempering Heat Treatment Processing on the Microstructure and Properties of High-Strength Hull Steel," *Metals*, vol. 12, no. 6, Art. no. 914, 2022.
[43] K. Maissara, F. Forouzan, P. Åkerfeldt, I. Timokhina, P. Åkerström, E. Vuorinen, and M.-L. Antti, „Effect of Tempering on Microstructure and Tensile Properties of Ultra-High Strength Steels for Press Hardening Applications," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 56, pp. 2570–2585, 2025.
[44] A. Çalık, O. Dokuzlar, and N. Uçar, „The effect of heat treatment on mechanical properties of 42CrMo4 steel," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 98, no. 1, pp. 5–10, 2020.
[45] A. Cyza, H. Adrian, and A. Kopia, „The Effect of Quenching Rate on Microstructure and Mechanical Properties of 34CrMo-4 Steel," *Hutnik – Wiadomości Hutnicze*, vol. 82, no. 4, pp. 262–268, 2015.
[46] J. M. Sarkisian, J. R. Palitsch, and J. J. Zecco, Jr., „Stepped, segmented, closed-die forging," Patent EP 0734294 B1, 1999.
47] *ISO 9227:2017, Corrosion tests in artificial atmospheres—Salt spray tests*. International Organization for Standardization, 2017.
[48] MotoIntegrator, „Łącznik stabilizatora – objawy awarii. Kiedy należy wymienić ten element?" [Online]. Available: https://motointegrator.com/pl/pl/poradniki/porady-eksploatacyjne/lacznik-stabilizatora-objawy-awarii-kiedy-nalezy-wymienic-ten-element. [Accessed: Jan. 5, 2026].
[49] Trodo, „Why stabilizer links break and how to prevent it," [Online]. Available: https://www.trodo.com/blog/why-stabilizer-links-break-and-how-to-prevent-it. [Accessed: Jan. 5, 2026].
[50] S. Sankar, „Design Optimization of Stabilizer Bar Link Used in Sedan Vehicles," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2019.
[51] N. F. Cofaru, L. I. Roman, V. Oleksik, and A. Pascu, „Generalized Modelling of the Stabilizer Link and Static Simulation Using FEM," *Acta Universitatis Cibiniensis – Technical Series*, vol. 68, 2016.
[52] Warsztat.pl, „Stabilizator i łącznik stabilizatora – przyczyny uszkodzeń," [Online]. Available: https://warsztat.pl/dzial/7-czesci-i-regeneracja/artykuly/stabilizator-i-lacznik-stabilizatora-przyczyny-usz,69873. [Accessed: Jan. 5, 2026].

[53] *EN 10263-4:2017, Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion—Part 4: Technical delivery conditions for steels for quenching and tempering*. European Committee for Standardization, 2017.
[54] Koelner Rawlplug IP, „Materiały wewnętrzne firmy Koelner Rawlplug IP," 2025.
[55] *ISO 898-1:2013, Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel—Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes—Coarse thread and fine pitch thread*. International Organization for Standardization, 2013.
[56] SAE International, *USCAR8, Grain Flow Pattern for Bolts and Screws*, 1998.
[57] *ISO 4759-1:2000, Tolerances for fasteners—Part 1: Bolts, screws, studs and nuts—Product grades A, B and C*. International Organization for Standardization, 2000.
[58] Alpha Knife Supply, [Online]. Available: https://www.alphaknifesupply.com/shop/vanadis-4e-carbon-steel?srsltid=AfmBOorq9aoZNHbg9stgKCc028FFkC6krHiTVp-X8O9px1YZ-cRY7QsV. [Accessed: Jan. 5, 2026].
[59] Uddeholm, [Online]. Available: https://www.uddeholm.com/poland/pl/product-category/stal-narzedziowa-do-pracy-na-zimno/ [Accessed: Jan. 5, 2026].
[60] Z. G. Wang, T. Hakoyama, Y. Takaya, N. Ibaraki, and K. Osakada, „A testing method of cold forging performance of steel wires," *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 281–284, 2020.

Spis rysunków

Rys. 1.1.1. Od lewej: walcówka w postaci zwojów kręgów umiejscowiona na bazie pieca przed rozpoczęciem procesu żarzenia; nakładanie kołpaka grzewczego na kołpak ochronny, pod którym umiejscowione są kręgi walcówki [1] - str. 9
Rys. 1.1.2. Zdjęcia obrazujące prawidłowy wygląd powłoki fosforanu nałożonej na walcówkę [1] - str. 10
Rys. 1.2.1.1. Porównanie zalet kucia na zimno w stosunku do obróbki mechanicznej w skali od 1 do 5 [opracowanie własne na podstawie danych zawartych w [4]] - str. 12
Rys. 1.2.1.2. Układ stacji roboczych w kuźniarce poziomej - str. 15
Rys. 1.2.2.1. Zasada procesu walcowania gwintu przedstawiona w formie schematu [11] - str.17
Rys. 1.3.1. Przykład matrycy stałej, wykonanej w całości z węglika wolframu [15] - str. 19
Rys. 1.3.2. Przykład matrycy segmentowej do produkcji nakrętek [16] - str. 19
Rys. 1.3.3. Przykład matrycy z wkładką z węglika spiekanego w obudowie stalowej [17] - str.19
Rys. 1.3.4. Sekwencja operacji spęczniania drugiej głowicy trzpienia odlewanego z zastosowaniem segmentowych wkładek narzędziowych. [19] - str. 22
Rys. 1.4.1. Schemat oddziaływania sił tarcia, rozkład nacisków i prędkości w procesie spęczania pręta: a) bez tarcia, b) z występowaniem tarcia; V_n – prędkość ruchu narzędzia, V_m – prędkość ruchu odkształcanego materiału [2] - str. 24
Rys. 1.4.2. Zależność nacisków od wymiarów próbki i współczynnika tarcia: p- średni nacisk jednostkowy, σ_{pl} – naprężenie uplastyczniające, μ - współczynnik tarcia, r – promień, h – wysokość [2] - str. 25
Rys. 1.4.3. Rozkład nacisków jednostkowych (MPa) na powierzchni wykroju końcowego w ostatnim etapie kucia w procesie: dwuzabiegowym (a, c) w matrycy: otwartej (a) i zamkniętej (c) oraz trójzabiegowym (b, d) w matrycy: otwartej (b) i zamkniętej (d) [2] - str. 26
Rys. 1.4.4. Siła w procesie kucia: a) w dwóch zabiegach, b) w trzech zabiegach w wykroju otwartym (s) i zamkniętym (z) [2] - str. 26
Rys. 1.5.1. Przykład pęknięć hartowniczych - str. 30
Rys. 1.5.2. Przykład pęknięcia kuźniczego na czole łba śruby (opracowanie własne na podstawie [33]). - str. 30

Rys. 1.5.3. Przykład pęknięć kuźniczych śrub z gniazdem - str. 31
Rys. 1.5.4. Przykłady wyrw kuźniczych - str. 31
Rys. 1.5.5. Pomiar szerokości wyrwy kuźniczej powstałej na łbie śruby - str. 32
Rys. 1.5.6. Przykład wyrwy poślizgowej - str. 32
Rys. 1.5.7. Przykład fałdy występujących na krawędzi zewnętrznej śruby - str. 35
Rys. 1.5.8. Przykład fałdy na gwincie – zawalcowania gwintu - str. 35
Rys. 1.5.9. Rodzaje wystąpienia fałdowania w procesie kucia, a) na skutek zbiegania się materiału, b) składanie powierzchni w literę 'V', c) lokalnie ze względu na zależność pomiędzy dwoma powierzchniami [38] - str. 37
Rys. 1.5.10. Przykład rys/pęknięć występujących na śrubach, pochodzących z materiału wejściowego - str. 39
Rys. 1.5.11. Przykład niewypełnienia na śrubie - str. 39
Rys. 1.5.12. Przykład śladów po narzędziach widocznych na powierzchni śruby - str. 40
Rys. 1.6.1. Układ pieców przelotowych do obróbki cieplnej (górne zdjęcia); śruby na taśmie transportowane do pieca do hartowania (dolne zdjęcia) [1] - str. 43
Rys. 1.8.1. Zdjęcia z procesu 100% selekcji optycznej, od lewej: widok w środku maszyny; ustawienie kontrolowanych charakterystyk w oprogramowaniu maszyny - str. 46
Rys. 2.1.1. Układ spęczek śruby kotwy R-XPT III [1] - str. 49
Rys. 2.1.2. a) Fragment technologii kucia wyrobu R-XPT III – operacja V, na której formowany jest łeb przy zastosowaniu matryc segmentowych zaznaczonych na rysunku; b) wyrób R-XPT III z zaznaczonym miejscem formowania matrycą segmentową [1] - str. 49
Rys. 2.1.3. Matryca segmentowa stosowana w produkcji wyrobu R- XPT III [1] - str. 51
Rys. 2.2.1. a) Fragment technologii kucia wyrobu M6x29,5 LH – operacja V, na której formowane jest zakończenie śruby przy zastosowaniu matryc segmentowych zaznaczonych na rysunku; b) wyrób M6x29,5 LH z zaznaczonym miejscem formowania matrycą segmentową [1] - str. 52
Rys. 2.2.2. Matryca segmentowa stosowana w produkcji M6 LH - str. 53
Rys. 6.1. Metodyka badań - str. 62
Rys. 6.1.1. Budowa łącznika stabilizatora [26] - str. 64
Rys. 6.2.1. Rysunek techniczny śruby łącznika stabilizatora - str. 67
Rys. 6.3.1 . Kolejność operacji procesu przygotowania materiału wejściowego do kucia ŚŁS gdzie oznaczenia stanu materiału opisane są następująco: U1C – trawienie; LC –

ciągnienie (kalibrowanie); U1EB – trawienie przed żarzeniem; AC1 – żarzenie; C – ciągnienie; - str. 69
Rys. 6.3.2. Struktura materiału 23MnB4 w stanie surowym (górne zdjęcia) oraz w stanie żarzonym (dolne zdjęcia). - str. 70
Rys. 6.3.3. Wytrzymałość na rozciąganie po poszczególnych etapach procesu przygotowania materiału 23MnB4 - str. 71
Rys. 6.3.4. Struktura testowej ŚŁS po procesie hartowania i odpuszczania - str. 72
Rys. 6.4.2.1. Model geometryczny wykorzystany w analizie MES - str. 74
Rys. 6.4.3.1. Krzywe płynięcia materiału przyjęte do analizy numerycznej, dostępne w bazie materiałów programu QForm 10.1.7 - str. 75
Rys. 6.4.3.2. Rozkład temperatury w kolejnych operacjach procesu kucia: a) operacja 1, b) operacja 2, c) operacja 3, d) operacja 4. - str. 77
Rys. 6.4.3.3. Rozkład naprężenia efektywnego w kolejnych operacjach procesu kucia: a) operacja 1, b) operacja 2, c) operacja 3, d) operacja 4. - str. 78
Rys. 6.4.3.4. Rozkład naprężenia średniego w kolejnych operacjach procesu kucia: a) operacja 1, b) operacja 2, c) operacja 3, d) operacja 4. Analiza MES wykonana w programie QForm 10.1.7 - str. 80
Rys. 6.4.3.5. Rozkład odkształceń plastycznych w kolejnych operacjach procesu kucia: a) operacja 1, b) operacja 2, c) operacja 3, d) operacja 4. Analiza MES wykonana w programie QForm 10.1.7 - str. 81
Rys. 7.1. Zdjęcie prototypu łącznika toczonego wraz z elementem kulistym - str. 83
Rys. 7.2. Zdjęcie obrazujące prawidłowe odwzorowanie zarysu promieni na łbie śruby wykonanej za pomocą obróbki skrawaniem; obraz z profilografu, obraz z projektora - str. 83
Rys. 8.1.1. Kształt półwyrobu po IV i III operacji kucia – pierwszy wariant prób technologicznych - str. 86
Rys. 8.1.2. Układ gniazd roboczych w przestrzeni kuźniarki, ze wskazaniem operacji IV - str. 86
Rys. 8.1.3. Matryca segmentowa zastosowana w operacji IV – wariant I prób technologicznych - str. 87
Rys. 8.1.4. Półwyroby otrzymane w operacjach I, II i III – wariant I prób technologicznych - str. 87
Rys. 8.1.5. Zdjęcie zarysu promieni uzyskanych w operacji III kucia – wariant I prób technologicznych - str. 88

Rys. 8.1.6. Zarys promienia po operacji III w wariancie pierwszym prób technologicznych - str. 89
Rys. 8.1.7. Układ włókien w operacji III wariantu pierwszego prób technologicznych - str. 89
Rys. 8.1.8. Układ włókien w obszarze promienia pod górnym kołnierzem łba (zdjęcia górne); w obszarze przejścia łba w szyjkę (dolne zdjęcia)– operacja III pierwszego wariantu prób technologicznych - str. 91
Rys. 8.2.1. Kształt spęczki w IV oraz III operacji kucia – drugi wariant prób technologicznych - str. 92
Rys. 8.2.2. Model narzędzi operacji IV - str. 92
Rys. 8.2.3. Matryca segmentowa opracowana w ramach prób technologicznych wariantu II - str. 93
Rys. 8.2.4. Obudowa matrycy segmentowej opracowanej w ramach prób technologicznych wariantu II - str. 94
Rys. 8.2.5. Matryca segmentowa wraz z ukształtowaną spęczką umieszczona w tulejce matrycy - str. 94
Rys. 8.2.6. Spęczki ukształtowane w wariancie drugim prób technologicznych - str. 95
Rys. 8.2.7. Kształt łba spęczki po operacji IV wykonanej w drugim wariancie prób technologicznych - str. 96
Rys. 8.2.8. Zdjęcie zarysu promieni uzyskanego w wariancie II prób technologicznych - str. 96
Rys. 8.2.9. Zarys promieni kołnierzy po operacji IV w wariancie drugim prób technologicznych - str. 97
Rys. 8.2.10. Układ linii płynięcia w operacji III wariantu drugiego prób technologicznych - str. 98
Rys. 8.2.11. Układ linii płynięcia w operacji IV wariantu drugiego prób technologicznych - str. 99
Rys. 8.2.12. Układ linii płynięcia materiału w obszarze promienia górnego kołnierza - str. 99
Rys. 8.2.13. Rysunek łba śruby z zaznaczonymi na żółto problematycznymi wymiarami - str. 100
Rys. 8.2.14. Zdjęcie łba śruby wraz z wskazaniem problematycznego promienia przejścia wykonanego prawidłowo (a); z występującą ostrą krawędzią – nieakceptowalne (b) - str. 101

Rys. 8.3.1. Macierz decyzyjności - str. 102
Rys. 8.3.2. Dodatkowa szczęka do walcowania promienia str. 103
Rys. 8.3.3. Walcowanie gwintu z równoczesnym kalibrowaniem kształtu promienia na łbie za pomocą dodatkowej szczęki str. 103
Rys. 8.3.4. Kształt łba spęczki finalnej po dodatkowej modyfikacji procesu walcowania str. 105
Rys. 8.3.5. Zdjęcie zarysu promieni po dodatkowej modyfikacji procesu walcowania str. 105
Rys. 8.3.6. Zarys łba po dodatkowej operacji walcowania promienia w czterech punktach dwóch płaszczyzn przekroju str. 106
Rys. 8.4.1. a) Zestaw narzędzi technologii kucia ŚŁS– operacja IV z zaznaczeniem tulejki; b) rysunek techniczny tulejki str. 108
Rys. 8.4.2. Kolejne modyfikacje kształtu tulejki w celu zwiększenia jej żywotności str. 108
Rys. 8.5.1.1. Zdjęcia obrazujące wypływki materiału na powierzchni czołowej oraz bocznej czoła ŚŁS (powiększenie 50x) str. 110
Rys. 8.5.1.2. Zdjęcie mikroskopowe obrazujące niewypełnienie górnej części kołnierza łba ŚŁS (powiększenie 50x) str. 111
Rys. 8.5.1.3. Zdjęcie mikroskopowe obrazujące niewypełnienie górnej powierzchni dolnego kołnierza łba ŚŁS (powiększenie 50x) str. 112
Rys. 8.5.1.4. Fragment rysunku technicznego ŚŁS z wymaganiem maksymalnego częściowego odwęglenia powierzchni równego 15 µm. str. 113
Rys. 8.5.1.5. Zdjęcia mikrostruktury w obszarze łba ŚŁS przedstawiające pomiar odwęglenia, które przekracza wymaganie max. 15µm (powiększenie 50x) str. 113
Rys. 8.5.1.6. Ilościowa weryfikacja skuteczności procesu usuwania fosforanów str. 114
Rys. 8.5.1.7. Metoda bezpośrednia oceny skuteczności usuwania fosforanów na ŚŁS str. 115
Rys. 8.5.1.8. Zdjęcia mikrostruktury w obszarze łba śruby przedstawiające pomiar odwęglenia, które spełnia wymaganie max. 15µm str. 116
Rys. 8.5.1.9. Porównanie stopnia odwęglenia materiału 23MnB4 w stanie surowym w stosunku do odwęglenia materiału po procesie żarzenia str. 116
Rys. 8.5.1.10. Pomiar wielkości odwęglenia w newralgicznym obszarze łba po procesie obróbki cieplnej z zwiększonym potencjałem węglowym atmosfery str. 117
Rys. 8.5.1.11. Punkty pomiarowe dla badania twardości w celu weryfikacji odwęglenia oraz nawęglenia str. 118

Rys. 8.5.1.12. Pomiar wielkości odwęglenia w newralgicznym obszarze łba po procesie obróbki cieplnej prowadzonej w atmosferze obojętnej str. 120
Rys. 8.5.1.13. Zdjęcia mikroskopowe obrazujące nawęgloną powierzchnię: na zakończeniu śruby oraz na gwincie (powiększenie 100x) str. 121
Rys. 8.5.1.14. Zdjęcie mikroskopowe przekroju poprzecznego drutu 23MnB4 w stanie żarzonym – ciągnionym, z warstwą wierzchnią polimeru (wg wytycznych bez fosforanu cynku) str. 125
Rys. 8.5.1.15. Zdjęcie mikrostruktury ŚŁS na powierzchni newralgicznej łba obrazujące wielkość odwęglenia dla materiału 23MnB4 z polimerem str. 135
Rys. 8.5.2.1. Zdjęcia ŚŁS po wytrzymaniu w komorze solnej podczas testów funkcjonalnych str. 126
Rys. 8.5.2.2. Zdjęcia śrub po zakończeniu testów w komorze solnej – po upływie 1800 godzin str. 129
Rys. 8.5.2.3. Uszkodzenia mechaniczne; od lewej: na gwincie, na powierzchni bocznej łba str. 130
Rys. 8.5.2.4. Uszkodzenia w obszarze przejścia stożkowej części łba w część cylindryczną str. 130
Rys. 8.5.2.5. Nadmiar powłoki ochronnej w gwincie str. 131
Rys. 9.1.1. Projekt przebiegu procesu produkcyjnego ŚŁS str. 133
Rys. 9.2.1. Projekt przebiegu procesu kontrolnego ŚŁS str. 136

Spis tabel

Tabela 1.5.1. Przegląd wad indukowanych płynięciem materiału wraz z mechanizmem ich powstawania i głównymi czynnikami wpływającymi na ich powstanie [34] - str. 34

Tabela 6.3.1. Skład chemiczny (% mas.) stali 23MnB4 zgodnie z EN 10263-4:2017 [53] - str. 68

Tabela 6.3.2. Parametry obróbki cieplnej testowej ŚŁS - str. 73

Tabela 6.3.3. Wyniki kontroli parametrów testowej ŚŁS po procesie obróbki cieplnej - str. 73

Tabela 8.2.1. Wyniki pomiarów problematycznych parametrów łba ŚŁS - str. 101

Tabela 8.5.1. Wyniki pomiarów twardości HV0,3 metodą weryfikacji odwęglenia zgodnie z punktem 9.10 normy ISO 898-1 dla próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym w atmosferze o podwyższonym potencjale węglowym - str. 119

Tabela 8.5.2. Wyniki pomiarów twardości HV0,3 metodą weryfikacji odwęglenia zgodnie z punktem 9.10 normy ISO 898-1 dla próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym w atmosferze obojętnej - str. 120

Tabela 8.5.3. Wyniki pomiarów twardości powierzchniowej na gwincie dla dwóch próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym przy zwiększonym potencjale węglowym - str. 122

Tabela 8.5.4. Wyniki pomiarów twardości powierzchniowej na gwincie dla dwóch próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonym przy obojętnym potencjale węglowym - str. 122

Tabela 8.5.5. Wyniki pomiaru twardości HV0,3 metodą weryfikacji nawęglenia zgodną z punktem 9.11 normy ISO 898-1, dla dwóch próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonej przy wyższym potencjale węglowym - str. 123

Tabela 8.5.6. Wyniki pomiaru twardości HV0,3 metodą weryfikacji nawęglenia zgodną z punktem 9.11 normy ISO 898-1, dla dwóch próbek pobranych po procesie obróbki cieplnej prowadzonej w warunkach atmosfery obojętnej - str. 124

Tabela 8.5.2.1. Wyniki obserwacji ŚŁS w komorze solnej - str. 128

Streszczenie

POLITECHNIKA RZESZOWSKA
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

STRESZCZENIE PRACY DOKTORSKIEJ

Analiza plastycznego kształtowania wyrobów śrubowych o specjalnym przeznaczeniu matrycami segmentowymi

Imię i nazwisko: mgr inż. Katarzyna Balawender
Promotor: dr hab. inż. Tadeusz Balawender, prof. PRz
Słowa kluczowe: matryce segmentowe, kucie na zimno, elementy złączne

Przedmiotem rozprawy doktorskiej było opracowanie i analiza technologii kucia na zimno śruby łącznika stabilizatora o nietypowej geometrii łba, charakteryzującego się wklęsło-wypukłą powierzchnią boczną. Głównym celem pracy było określenie możliwości kształtowania tego rodzaju geometrii z wykorzystaniem matrycy segmentowej w procesie kucia na kuźniarce oraz identyfikacja warunków technologicznych pozwalających na uzyskanie wymaganej geometrii i jakości odkuwki.

W ramach realizacji pracy przeprowadzono analizę procesu plastycznego kształtowania materiału podczas kolejnych etapów kucia, ze szczególnym uwzględnieniem sposobu wypełniania wykroju matrycy segmentowej oraz kształtowania wklęsło-wypukłej powierzchni bocznej łba śruby. Analizie poddano wpływ przyjętej geometrii narzędzi oraz kolejności osadzenia w gnieździe roboczym kuźniarki na możliwość uzyskania założonego kształtu odkuwki.

Przeprowadzone badania pozwoliły określić warunki technologiczne, przy których możliwe jest prawidłowe ukształtowanie wklęsło-wypukłej powierzchni łba śruby łącznika stabilizatora. Wyniki badań potwierdziły możliwość zastosowania matrycy segmentowej do realizacji analizowanego procesu kucia na zimno. Opracowane rozwiązanie technologiczne pozwala na uzyskanie wymaganej geometrii elementu przy zachowaniu odpowiedniej jakości odkuwki i stanowi podstawę do wdrożenia technologii w warunkach przemysłowych.

Przeprowadzone badania pozwoliły na opracowanie kompletnego procesu wytwarzania i kontroli śruby łącznika stabilizatora.

Abstract

RZESZOW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics

DOCTORAL THESIS ABSTRACT

Analysis of the Plastic Forming of Special-Purpose Bolts Using Segmented Dies

Name and surname: Katarzyna Balawender, MSc Eng
Supervisor: Tadeusz Balawender, PhD, DSc, Assoc. Prof. Rzeszow University of Technology
Key words: segmented dies, cold forging, bolts

The subject of the doctoral dissertation was the development and analysis of a cold forging technology for a stabilizer link bolt with an unconventional head geometry, characterized by a concave-convex lateral surface. The main objective of the study was to determine the feasibility of forming such a geometry using a segmented die in a forging machine and to identify the technological conditions that allow the required geometry and quality of the forging to be achieved.

As part of the study, an analysis of the plastic forming process of the material during the successive forging stages was carried out, with particular emphasis on the manner in which the segmented die cavity is filled and on the formation of the concave-convex lateral surface of the screw head. The influence of the adopted tool geometry and the sequence of positioning the components in the working cavity of the forging machine on the possibility of obtaining the assumed forging shape was analyzed.

The conducted research made it possible to determine the technological conditions under which the concave-convex lateral surface of the stabilizer link bolt head can be properly formed. The research results confirmed the possibility of using a segmented die to carry out the analyzed cold forging process. The developed technological solution enables the required geometry of the component to be obtained while maintaining the appropriate quality of the forging and provides a basis for implementing the technology under industrial conditions.

The conducted research enabled the development of a complete manufacturing and inspection process for the stabilizer link bolts.