

Kazimierz Drozd*

FRAKTOGRAFICZNE I METALOGRAFICZNE BADANIA USZKODZEŃ SPRĘŻYN ZAWIESZENIA POJAZDÓW

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wybranych właściwości uszkodzonych sprężyn stalowych montowanych w zawieszeniach pojazdów. Badania miały na celu przeanalizowanie problematyki określania przyczyn uszkodzeń i próbę ich usystematyzowania. Najczęściej obserwowaną, bezpośrednią, przyczyną przełomu, było występowanie mikropęknięć na powierzchni uszkodzonych elementów w obszarze przełomu. Kompleksowe wyniki analizy składu chemicznego, badań makro – i mikroskopowych oraz badań twardości pozwalają wskazać przyczyny powstawania mikropęknięć w materiale nawet wtedy gdy sam skład chemiczny i analiza twardości elementów nie wskazuje na możliwe przyczyny uszkodzenia.

Słowa kluczowe: przełom sprężyny, mikrostruktura, odwęglenie

Wprowadzenie

W wielu konstrukcjach inżynierskich stosuje się elementy mające za zadanie akumulację energii odkształcenia w zakresie sprężystym. Z bardziej znanych grup można wymienić sprężyny talerzowe, stabilizatory i drążki sprężyste, belki skrętne, sprężyny śrubowe i resory piórowe. Części takie stosuje się również w celu zabezpieczenia innych, bardziej odpowiedzialnych lub droższych elementów, przed niszczącymi przeciążeniami niemożliwymi do przewidzenia z powodu silnie zmiennych warunków eksploatacji, jak w przypadku większości rolniczych maszyn uprawowych [6]. Większość tych konstrukcji znajduje zastosowanie jako elementy sprężyste w zawieszeniach pojazdów samochodowych, ciągników, przyczep i specjalistycznych maszyn [12]. Zastosowanie sprężyn jako elementów zawieszenia lub do pełnienia funkcji wodzących ma na celu zapewnienie niezbędnego kontaktu koła lub ostrza narzędzia z podłożem [17].

Aktualnie prowadzi się badania weryfikujące możliwości zastosowania innych tworzyw inżynierskich jako elementów sprężystych. W szczególności duże nadzieje wiąże się z materiałami kompozytowymi, których niewątpliwą zaletą jest mała masa właściwa i odporność na czynniki korozyjne. Wykorzystywanie kompozytów na podstawie polimerów zbrojonych włóknami, o budowie warstwowej, jako elementów sprężystych było przedmiotem wielu badań i aktualnie rozwiązania takie są opatentowane i stosowane w przypadkach gdzie koszty materiałowe są mniej istotne [2, 21]. Korzystne jest stosowanie materiałów kompozytowych w przypadku gdy mają one zastąpić klasyczną stalową sprę-

* Katedra Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska, k.drozd@pollub.pl

zynę płaską. Ważną ich zaletą jest zdolność do tłumienia drgań wynikająca z dużego tarcia wewnętrznego [18].

Elementy sprężyste powszechnie wykonywane są ze stali, zwykle niskostopowych [5], o średniej zawartości węgla i kształtowane w celu uzyskania możliwie dużej wartości stosunku granicy plastyczności R_e do granicy wytrzymałości R_m [11]. Dotychczasowe badania, w tym prowadzone przez autora, wykazały, że kluczowym problemem technologicznym, który ma istotny wpływ na właściwości stalowych elementów sprężystych, jest przeprowadzenie ich obróbki cieplnej w sposób zapewniający uniknięcie powiększania się strefy odwęglenia warstwy wierzchniej [7, 13].

Korzystną strukturę rdzenia materiału oraz wysoką trwałość i wytrzymałość zmęczeniową elementów wykonywanych ze stali sprężynowych można uzyskać poprzez hartowanie i niskie odpuszczanie [15, 19]. Niektórzy badacze zwracają uwagę, że kształtowanie warstw wierzchnich w celu zmiany stanu naprężeń, poprzez wygenerowanie naprężeń własnych ściskających, powoduje istotne zwiększenie trwałości zmęczeniowej sprężyn w warunkach laboratoryjnych do trzech rzędów wielkości [9, 20]. Do tego celu proponuje się zabiegi odkształcania na zimno [10], nasycania warstwy wierzchniej pierwiastkami [14] oraz kompleksową obróbkę cieplno-chemiczną i plastyczną [1].

Uszkodzenie sprężyny, szczególnie pełniącej rolę wodzącą lub prowadzącą jest przyczyną strat materialnych i problemów organizacyjnych przedsiębiorstw, zwłaszcza transportowych. Ocenia się, że trwałość elementów sprężystych jest zwykle mniejsza od rezerwy węzłów kinematycznych występujących w tym samym urządzeniu [16]. Specyfika pracy sprężyn wpływa na to, że niewielkie niedoskonałości struktury materiału mogą powodować istotny wpływ na trwałość zmęczeniową. Badania przyczyn uszkodzeń prowadzi wiele zespołów a publikacje na ten temat ukazują się w czasopiśmie o światowym zasięgu [3,4].

Ostatnio dominuje przekonanie, że dalszy rozwój technologii sprężyn będzie postępował w wyniku rozpoznania i eliminowania strukturalnych przyczyn występowania konkretnych przypadków uszkodzeń. Niniejsza publikacja ma na celu wskazanie przykładów i usystematyzowanie niektórych przyczyn uszkodzeń silnie obciążonych elementów sprężystych zawieszonych wykonanych ze stali. Najwięcej uwagi, podobnie jak w aktualnie publikowanych badaniach, poświęcono aspektom strukturalnym i wpływu środowiska pracy. Problem uszkodzeń eksploatacyjnych sprężyn jest o tyle istotny, że, w wyniku globalizacji, dotyczy również krajowego przemysłu, który zaopatruje w sprężyny wiele zagranicznych koncernów [8].

1. Zakres i metodyka badań

Przeprowadzono badania, mające na celu określenie przyczyn uszkodzeń sprężyn oraz przykładowe oznaczenie składu chemicznego materiału, z którego wykonano uszkodzony element i jego zgodność z odpowiednimi normami materiałowymi. Obiektem badań były przełomy, uszkodzone pióra resorowe, sprężyny zawieszenia i drążki skrętne. Wszystkie badane elementy były wykonane ze stali stopowych z grupy sprężynowych, charakteryzujących się dużą hartownością.

Zakres badań obejmował:

- badania faktograficzne i makroskopowe przełomów oraz powierzchni elementów uszkodzonych,
- analizę składu chemicznego,
- badania struktury materiału,
- określenie głębokości warstwy odwęglonej metodą mikroskopową,
- oznaczenie, metodą metalograficzną, stopnia zanieczyszczenia badanych struktur wtrąceniami niemetalicznymi,
- badania twardości uszkodzonych elementów.

Badania fraktograficzne przeprowadzono bezpośrednio z użyciem przełomów oraz w oparciu o obrazy uzyskane na mikroskopie stereoskopowym Nikon typu SMZ 1500. Obróbkę zdjęć i wyznaczanie zakresu stref przełomu wykonano posługując się oprogramowaniem ImagePro Plus. Do analizy składu chemicznego użyto spektrometru rentgenowskiego Philips PW 2400. Badań metalograficzne mikroskopowe zglądów przygotowanych z badanych elementów prowadzono na mikroskopie Nikon typu MA 200, umożliwiającym wykonywanie obserwacji w polu jasnym i ciemnym. Do badań twardości uszkodzonych elementów użyto hydraulicznego twardościomierza Brinella typu B2.

2. Badania makroskopowe i fraktografia przełomów

Zużycie lub uszkodzenie elementów sprężystych zawieszek prowadzi do zmian charakteru obciążenia zarówno samego zawieszenia jak i układu jezdnego pojazdu. Na rysunku 1 przedstawiono typowy przypadek zużycia resoru piórowego w wyniku zaniedbań serwisowych. Początkowo, jedna z obejm ustalających pióra względem pióra głównego uległa uszkodzeniu. Nie spowodowało to przemieszczania (obracania wokół śruby centralnej) piór względem siebie i prawdopodobnie dlatego początkowo nie zwrócono uwagi na to uszkodzenie. Istotne jest, że w obszarze sąsiadującym z uszkodzoną obejmą pióra nie stykały się ze sobą podczas dalszej eksploatacji. Szczelina jest widoczna również pomiędzy piórami pierwszymi (głównym i drugim, drugim i trzecim), które są mocowane kolejną, nieuszkodzoną obejmą. W konsekwencji w szczelinę pomiędzy pióra dostawała się woda, która powodowała korozję powierzchni uszkodzonej w wyniku tarcia.



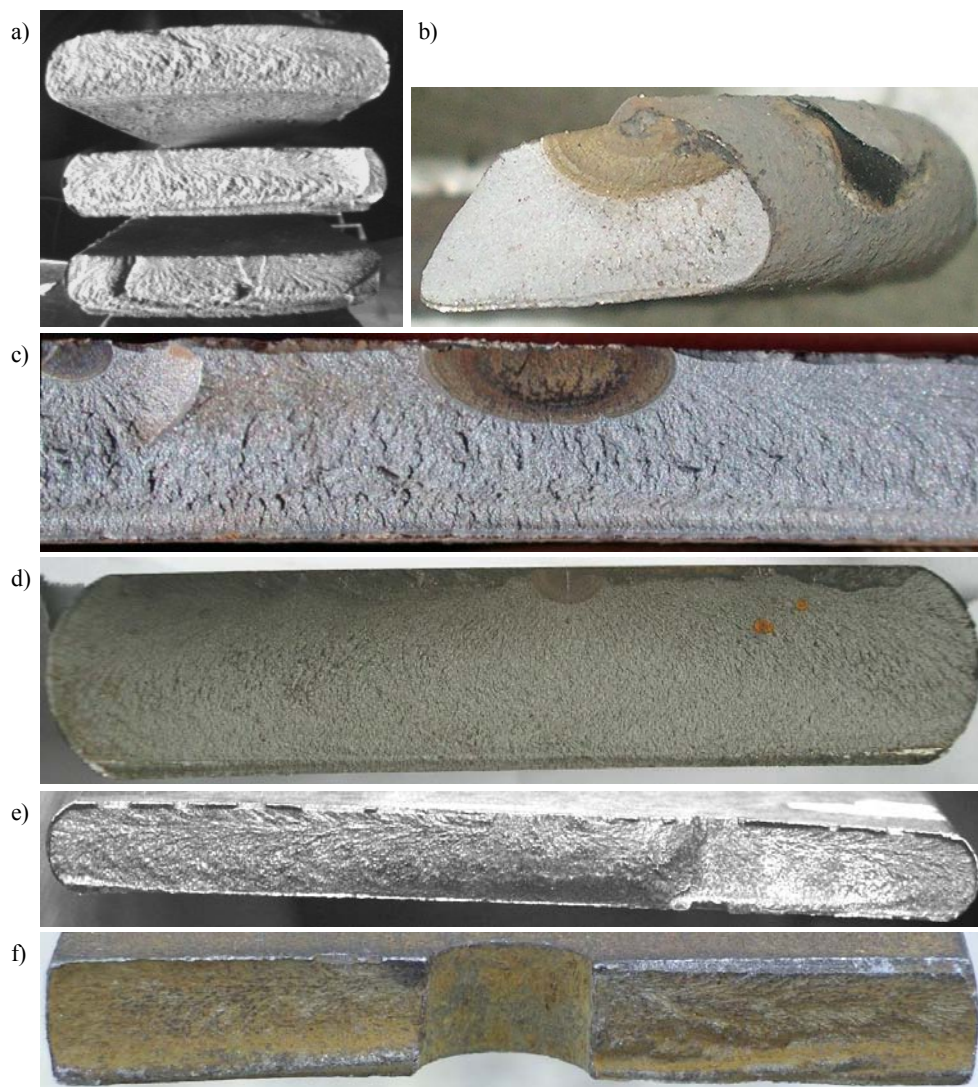
Rys. 1. Resor przyczepy zniszczony przez korozję

W efekcie narastania produktów korozji (rys. 1) kolejne pióra były obciążone nie tylko siłą pochodzącą od obciążenia pojazdu ładunkiem, lecz również ulegały odkształceniom spowodowanym występowaniem produktów korozji pomiędzy piórami. Po pewnym czasie eksploatacji, najkrótsze pióra zaczęły ulegać odkształceniu plastycznemu. Wniosek ten jest oczywisty jeśli weźmie się pod uwagę, że kolejne pióra są kształtowane fabrycznie z odpowiednio większą krzywizną, czyli pomimo uszkodzenia obejmują końce piór powinny przylegać do piór dłuższych. W tym przypadku widoczne jest, że końce piór nie mają kontaktu z piórami położonymi wyżej. W wyniku zużycia pióra o numerze większym niż 5 włączają się do pracy dopiero po zlikwidowaniu tego dystansu w rezultacie ugięcia piór dłuższych, czyli pełnią rolę podobną do resoru dodatkowego. Zadaniem resoru dodatkowego jest również włączanie się do pracy wtedy, gdy resor główny ulegnie ugięciu umożliwiającemu osiągnięcie kontaktu (zredukowanie dystansu) pomiędzy piórami resoru głównego i dodatkowego.

Wykonanie badań makroskopowych zwykle jest utrudnione z powodu występowania produktów korozji na przelomach. Korozja na przelomie nie zdąży zajść, gdy uszkodzenie wiąże się z koniecznością wycofania pojazdu z ruchu. W przypadku zestawu sprężyn płaskich o przekroju zmiennym wg paraboli najczęściej zdarza się pęknięcie wszystkich piór z pakietu jednocześnie i zwykle wiąże się to z przeciążeniem konstrukcji (rys. 2a). Pęknięcie kilku piór ma charakter przelomu doraźnego międzykrystalicznego, gdzie pojedyncze kryształy wystają z powierzchni przelomu. Wszystkie pióra pękają w tym samym miejscu konstrukcji tzn. w takiej samej lub zbliżonej odległości od miejsca zamocowania. Podobnie, jeżeli pęknięcie rozwijało się w dłuższym czasie a sprężyna o dowolnej konstrukcji zostanie wymontowana bezpośrednio po jej uszkodzeniu, występowanie korozji na części powierzchni przelomu może ułatwić precyzyjnie wskazać ognisko.

Zdarza się, że materiał nie ulega doraźnemu uszkodzeniu lecz przelom rozprzestrzenia się w pewnym czasie i ma charakter przelomu zmęczeniowego (rys. 2b). W silnie wyciężonych elementach ze stali po ulepszeniu cieplnym, na przelom zmęczeniowy składa się wyraźna część przelomu transkrystalicznego, tj. przebiegającego przez ziarna materiału. Ta część przelomu wygląda na „gładką”. Pozostała część powierzchni przelomu ma charakter doraźny i wygląd taki jak przelom doraźny opisany w poprzednim akapicie. Na fotografii widoczne są również ubytki w lakierniczej powłoce ochronnej, występujące w okolicach przelomu. Podobną zależność pomiędzy występowaniem ubytków bądź uszkodzeń powłok ochronnych obserwowano w większości uszkodzonych fragmentów sprężyn, niezależnie od ich typu konstrukcyjnego.

Dokładniejsza analiza strefy przelomu zmęczeniowego na rys. 2b i 2c pozwala na dostarczenie linii przestankowych które ujawniają położenie ogniska przelomu w górnej jego części przy powierzchni elementu. Na rys. 2c-2e widoczny jest inny charakter przelomu w części najbliższej powierzchni elementów. Spowodowane jest to zmodyfikowaną warstwą wierzchnią w celu uzyskania naprężeń własnych ściskających. Modyfikacja rozkładu naprężeń spowodowana występowaniem naprężeń własnych wpływa na zmianę przebiegu przelomu w warstwie umocnionej w ten sposób. W przedstawionych przelomach ognisko znajduje się pod powierzchnią materiału, to znaczy w miejscu, gdzie w wyniku modyfikacji warstwy wierzchniej wystąpiło maksimum wartości naprężeń.



Rys. 2. Przelomy badanych sprężyn zawieszenia

Stosunek powierzchni całego przelomu do jego części doraźnej świadczy o „rzeczywistym” współczynniku bezpieczeństwa konstrukcji. W przypadku przelomu sprężyny przedstawionego na rys. 2b wartość tego współczynnika wynosiła 1,22 a dla przelomu na rys. 2c – 1,082. Współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji w chwili uszkodzenia pióra przedstawionego na rys. 2d wynosił 1,013. Dwie ostatnie wartości są szczególnie małe, ponieważ w literaturze podaje się, że we współczesnych konstrukcjach sprężyn stosowanych w zawieszaniach pojazdów współczynnik bezpieczeństwa wynosi od 1,3 do 1,7. Jeżeli dostępne są dane dotyczące pełnego stanu obciążenia sprężyny to wartości współczynnika bezpieczeń-

stwa mogą być przyjmowane z zakresu 1,1 – 1,2 [5, 16]. Wynika stąd, że przy konstruowaniu sprężyn przedstawionych na rys. 2c i 2d przyjęto współczynnik bezpieczeństwa o zbyt małej wartości.

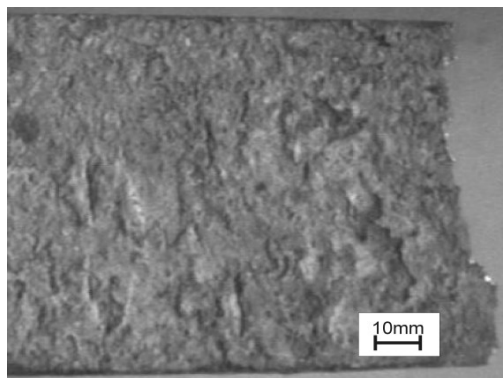
Jeżeli materiał charakteryzuje się niejednorodnością składu chemicznego, zawiera wtrącenia niemetaliczne lub z innych przyczyn charakteryzuje się silną anizotropią właściwości, powierzchnia przełomu może zawierać liczne uskoki zarówno na części zmęczeniowej przełomu jak i na części doraźnej. Na części zmęczeniowej, uskoki te mogą być mieć kształt zbliżony do łuków, których teoretyczny środek krzywizny znajdowałby się w okolicy ogniska przełomu. Na obu częściach przełomu zmęczeniowego (zmęczeniowej i doraźnej) mogą występować uskoki rozmieszczone promieniście w stosunku do ogniska przełomu zmęczeniowego. Powierzchnia takich przełomów jest bardziej rozwinięta, tzn. ich kształt bardziej odbiega od płaszczyzny a niekiedy zawiera jakby wyrwania materiału w kierunku prostopadłym do powierzchni przełomu. Przykłady takich przełomów zamieszczono na rys. 2c, 2e i 2f. W takich przypadkach przyczyn uszkodzenia należy poszukiwać w mikrostrukturze bądź technologii obróbki materiału.

Jedno z piór, dla których prowadzono dalsze badania mikroskopowe charakteryzowało się występowaniem powłoki lakierniczej o zadowalającej jakości i miało zmienny przekrój (zmienną grubość pręta). Na dużej części jego długości miało prosty kształt (zerowa krzywizna). Pęknięcie nastąpiło w części o mniejszej grubości, charakteryzującej się również większą krzywizną. W okolicy przełomu (rys. 2e) pióro było pokryte produktami korozji, co uniemożliwiło dokładne określenie charakteru i odtworzenie propagacji pęknięcia. Wyciągnięto wniosek, że prawdopodobna przyczyna jego uszkodzenia była związana z jakością materiału lub przebiegiem procesu wytwarzania. Z uskoku na przełomie można dodatkowo wnioskować, że warstwa wierzchnia różniła się właściwościami od pozostałej części przełomu (rdzenia).

Pęknięcie przez otwór centralny (rys. 2f) najczęściej występuje w przypadku resorów naprawianych i świadczy o zastosowaniu zbyt małej wartości momentu do skręcenia piór śrubą. W resorach z piórami o stałym przekroju najczęściej uszkodzeniu ulega jedno pióro, choć niezauważone powoduje osłabienie konstrukcji i w rezultacie może pękać większa liczba piór, zwykle sąsiadujących.

3. Zużycie powierzchni elementów sprężystych

Najczęściej obserwowaną przyczyną przełomów było występowanie mikropęknięć na powierzchni elementów, które następnie rozwijały się w większym obszarze. Widok rozciąganej podczas eksploatacji powierzchni pióra resorowego wskazuje bezpośrednią przyczynę jego uszkodzenia. Jeżeli na tej powierzchni (szczególnie w obszarze sąsiadującym z przełomem) widoczne są pęknięcia usytuowane w poprzek pióra (rys. 3), to stanowiły one karby umożliwiające propagację pęknięcia. Nawet w przypadku braku pęknięć na powierzchni mogą je ujawnić badania mikroskopowe na zglądach wykonanych poprzez usunięcie wierzchniej warstwy materiału pióra w pobliżu przełomu, co zostanie przedstawione w dalszej części niniejszej pracy i na rys. 4a.



Rys. 3. Powierzchnia pióra resorowego, rozciągana podczas eksploatacji, z produktami korozji. Widoczne miejsca inicjacji pęknięć przebiegające w kierunku równoległym do przelomu

4. Analiza składu chemicznego

Oznaczony skład chemiczny materiału, którego przelom przedstawiono na rys. 2e, odpowiada stali stopowej sprężynowej 50CrV4 wg DIN 17221-72 lub stali 50HF wg PN-74/H-84032 (tabela 1). Stale te, po ulepszeniu cieplnym, charakteryzują się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi i największą hartownością spośród stali sprężynowych. Zaleca się stosować te materiały na silnie obciążone sprężyny, o dużych przekrojach, zwłaszcza podlegające silnym zmiennym i przemiennym obciążeniom, w tym na najbardziej obciążone elementy sprężyste zawieszzeń pojazdów [13, 15].

Tabela 1. Skład chemiczny jednej ze sprężyn użytych do badań

Skład chemiczny [% masy]									
Pierwiastek		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	V
badany materiał		0,51	0,79	0,24	0,030	0,015	1,00	0,14	0,15
50CrV4	min	0,47	0,70	0,15			0,90	brak danych	0,10
	max	0,55	1,10	0,40	0,035	0,035	1,20		0,20
50HF	min	0,46	0,50	0,15			0,80		0,10
	max	0,54	0,80	0,40	0,030	0,030	1,10	0,40	0,20

5. Mikrostruktura i odwęglenie badanych sprężyn

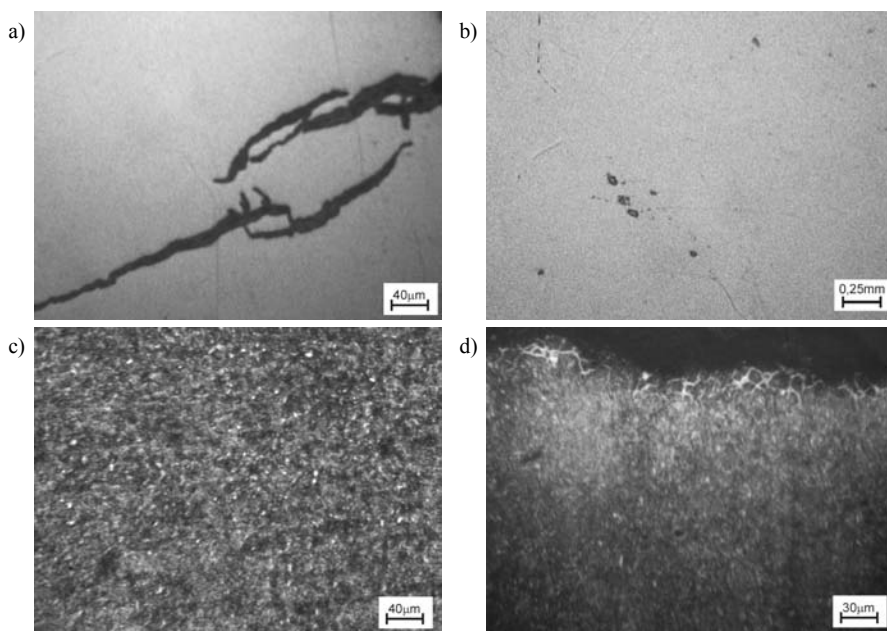
Na zglądzie nietrawionym z powierzchni sprężyny w pobliżu przelomu, po usunięciu warstwy o grubości około 0,5mm, można zaobserwować mikropęknięcia (stanowiące lokalne karby) przebiegające w kierunku równoległym do powierzchni przelomu (rys. 4a).

Propagacja tych pęknięć, w kierunku zależnym od kierunku największych naprężeń oraz struktury materiału, była bezpośrednią przyczyną uszkodzeń. Dalsze badania miały na celu wyjaśnienie genezy powstania karbów tego typu na elementach sprężystych.

Tabela 2. Zanieczyszczenia materiału sprężyny wtrąceniami niemetalicznymi

Rodzaj wtrącenia								
TŁ	KK	KP	max(TŁ, KK, KP)	TP	KN	S	AT	AA
0	1	0	1	1	1	1	0	0

Na zgładzie trawionym odczynnikiem $Mi1Fe$ zidentyfikowano strukturę sorbitu, najczęściej z zachowanym układem „iglastym” jak ta przykładowa struktura przedstawiona na rys. 4c. Taka struktura jest charakterystyczna dla stali po hartowaniu i odpuszczaniu średnim lub wysokim. W literaturze podaje się, że mikrostruktura stali sprężynowej po ulepszeniu cieplnym nie powinna wykazywać układu iglastego [16]. Jest jednak mało prawdopodobne, aby wyłącznie ta przyczyna powodowała powstawanie mikropęknięć.



Rys. 4. Struktura materiału sprężyn: pęknięcia widoczne na zgładzie nietrawionym a), wtrącenia niemetaliczne b), mikrostruktura rdzenia c), warstwa wierzchnia odwęglona d)

Granice ziaren były widoczne przy powiększeniu około 200x, a igły martenzytu widoczne przy powiększeniu 100x. Wystąpiła tu niezgodność z normą [PN-90/S-47250], która wymaga, aby przy powiększeniu 500x nie były widoczne granice ziaren. Typowy obraz struktury warstwy przypowierzchniowej przedstawiono na rys. 4d. Głębokość odwęglenia dla tej struktury określono na około 0,03mm. Obserwowano wyłącznie strefę przejściową, a odwę-

glenia zupełnego w ogóle nie stwierdzono na żadnej z obserwowanych warstw wierzchnich. Głębokość odwęglenia najczęściej była mała i nie powinna mieć znaczącego wpływu na właściwości wytrzymałościowe materiału po ulepszeniu cieplnym.

Stopień zanieczyszczenia materiału wtrąceniami niemetalicznymi określono na nietrawionym zglądzie poprzecznym (rys. 4b). Badane elementy wykazują niski stopień zanieczyszczenia wtrąceniami niemetalicznymi co wynika z danych zamieszczonych w tabeli 2. Wtrącenia pasmowe (KP i TP) w zasadzie nie występują (maksymalna wartość wskaźnika równa 1). Występowania wtrąceń łańcuszkowych (TL) nie stwierdzono w ogóle. Na uwagę zasługuje również fakt, że mikropęknięcia widoczne na zglądzie nietrawionym (rys. 4a) nie rozprzestrzeniają się między wtrąceniami. Świadczy to o tym, że wtrącenia nie miały istotnego wpływu na propagację pęknięć w uszkodzonym elemencie.

6. Badania twardości materiału

Badania twardości sprężyn stalowych, w szczególności ich rdzenia, zaleca się prowadzić aparatem Brinella. Ma to na celu określenie twardości materiału w większej skali z powodu większych wymiarów odcisku niż w przypadku odcisku stożka Rockwella. Głębokość penetracji wgłębnika nie stanowi ograniczenia w stosowaniu metody Brinella do badania twardości powierzchni piór, ponieważ największa głębokość odcisku nie przekracza 0,3mm (dla kulki o średnicy 10mm). Oznacza to, że najmniejsza grubość próbki, jaką można badać, wynosi około 2,4mm, czyli jest mniejsza niż grubości sprężyn zawieszek aktualnie stosowanych w pojazdach. Jeżeli grubość pióra lub średnica drutu sprężyny jest nie mniejsza niż około 9mm, to, przy zastosowaniu kulki o średnicy 5mm, można również badać twardość rdzenia na przekroju poprzecznym elementu.

Twardość badano aparatem Brinella z zastosowaniem kulki $\phi 10$ i $\phi 5$ przy obciążeniach odpowiednio 29,42kN (skala HB10/3000) i 7355N (skala HB5/750). Średnia twardość mierzona na powierzchni, po usunięciu warstwy odwęglonej, miała wartość 414HB10/3000 i 393HB5/750. Średnia twardość mierzona na przekroju elementów miała wartość 412-449HB5/750. Zmierzone wartości zawierają się powyżej średniej w granicach 363-460HB podawanych w literaturze. Rozbieżności pomiędzy przytoczonymi wartościami twardości wskazują na istotne różnice właściwości powierzchni i rdzenia w przypadku piór resorowych dla których stosowano kształtowanie warstw wierzchnich na zimno. O różnicach właściwości powierzchni elementów uszkodzonych i ich rdzenia można wnioskować z samego charakteru przełomu oraz z porównania mikrostruktury.

7. Wnioski

Najczęściej obserwowaną, bezpośrednią przyczyną przełomów było występowanie mikropęknięć. Analiza chemiczna i mikroskopowa, występowania zanieczyszczeń i wtrąceń niemetalicznych w materiale badanych sprężyn, nie wykazały możliwych powodów powstania mikrokarbów w badanych elementach. Materiał ma strukturę o zbyt dużych ziarnach, jed-

nak występowanie faz w mikrostrukturze jest typowe dla stali sprężynowych po ulepszeniu cieplnym. Twardość materiału jest zgodna z normą, a przy powierzchni występuje wyłącznie przejściowa strefa odwęglenia.

Przyczyną powstawania mikropęknięć w okolicach przelomu było występowanie ognisk korozji wywołujących efekt mikrokarbu. Należy zwrócić uwagę, że badane sprężyny ulegały korozji niemal wyłącznie w okolicy przelomów. Może to świadczyć o niedostatecznym zabezpieczeniu powierzchni materiału powłoką malarską lub szczególnym narażeniu na działanie środowiska korozyjnego właśnie tej części elementów.

Występowanie pęknięć na rozciąganej podczas eksploatacji (wewnętrznej) powierzchni piór resorów może być spowodowane zbyt małą wartością naprężeń własnych w warstwie wierzchniej materiału. Z badań makroskopowych i pomiarów twardości można wnioskować, że obróbka przez zgniot była prowadzona dla wszystkich sprężyn. Profil niektórych piór, zawierający w stanie swobodnym proste odcinki wskazuje, że zostały one wcześniej nadmiernie obciążone, przez co ich krzywizna uległa trwałej zmianie. Za tą tezę przemawia również uszkodzenie powłoki lakierniczej.

W wyniku badań uszkodzonych sprężyn można stwierdzić, że przelom sprężyn płaskich najczęściej następuje w miejscu spiętrzenia naprężeń (np. na granicy podparcia kolejnym piórem), w okolicy jarzma mocującego resor do belki zawieszenia lub mostu napędowego, w pobliżu obejm ustalającej pióra przed względnym przesuwaniem się (obracaniem wokół śruby centralnej). Uszkodzenia ucha resoru lub części mocującej zdarzają się zwykle w przypadkach znacznego przekroczenia wytrzymałości konstrukcji podczas najechania na dużą przeszkodę lub w wyniku wypadku. Niezależnie od konstrukcji sprężyny, w okolicy badanego przelomu występują uszkodzenia powłok ochronnych i powierzchni elementów.

Na podstawie przeprowadzonych badań uszkodzonych elementów można wysnuć następujące wnioski ogólne:

1. Materiał sprężyn, które uległy uszkodzeniu, charakteryzował się obecnością wad powierzchniowych, które przyczyniły się do propagacji pęknięć oraz do powstawania uszkodzeń.
2. Wady materiałowe wykryte w warstwie wierzchniej elementów sprężystych, takie jak: wtrącenia niemetaliczne, odwęglenie powierzchni, wżery korozyjne i zawalcowania powodowały powstawanie wielu ognisk pęknięć zmęczeniowych skupionych na małym obszarze w sąsiedztwie przelomu. Rozwój tych pęknięć można śledzić na badanych przelomach.

Literatura

1. Ardehali Barani A., Li F., Romano P., Ponge D., Raabe D.: Design of high strength steels by microalloying and thermomechanical treatment. *Materials Science & Engineering*, 2007, A463, s. 138-146.
2. Aulich C., Foerster R., Kempe H.: Leaf spring consisting of a fibre-composite material. IFC Composite GmbH. European Patent Office. Opis patentowy. EP1948960. Opubl. 2008.
3. Beretta S., Murakami Y.: Statistical analysis of defects for fatigue strength prediction and quality control of materials. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1998, 21, s. 1049-1065.

4. Bergengren Y., Larsson M., Melander A.: The influence of machining defects and inclusions on the fatigue properties of a hardened spring steel. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1995, 18, s. 1071-1087.
5. Branowski B.: *Sprężyny metalowe*. PWN, Warszawa 1997.
6. Dreszer K.A. (et all.): Wybrane systemy regulacji i zabezpieczeń przed przeciążeniami pługów. *Technika rolnicza – ogrodnicza – leśna*, 2007, 3.
7. Drozd K., Weroński A.: Influence of heat treatment and corrosion atmosphere on surface layer properties of selected spring steels. *Inżynieria Materiałowa*, 2004, 140, s. 713-716.
8. Furuya Y.: Notable size effects on very high cycle fatigue properties of high strength steel. *Materials Science & Engineering*, 2011, A528, s. 5234-5240.
9. Furuya Y., Abe T.: Effect of mean stress on fatigue properties of 1800MPa-class spring steels. *Materials & Design*, 2011, 32, s. 1101-1107.
10. Harada Y., Fukaura K., Haga S.: Influence of microshot peening on surface layer characteristics of structural steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 191, s. 297-301.
11. Kandrotaitė Janutienė R., Žvinys J.: Experimental analysis of transformation plasticity and stress relaxation of carbon spring steel during tempering. *Mechanika*, 2008, 6, s. 77-80.
12. Kosobudzki M., Jamroziak K.: Budowa ustrojów nośnych zawiesznień samochodów ciężarowo-osobowych wysokiej mobilności sił zbrojnych RP. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Łądowych*, 2009, 152, s. 97-112.
13. Lee C.S., Lee K.A., Li D.M., Yoo S.J., Nam W.J.: Effect of heat treatment on fatigue resistance of spring steel 60SiCr7VAT. *Metal Science & Heat Treatment*, 2010, 52, s. 57-60.
14. Nie Y., Hui W., Fu W., Weng Y.: Effect of boron on delayed fracture resistance of medium-carbon high strength spring steel. *Journal of Iron and Steel Research*, 2007, 14, s. 53-57.
15. Palma E.S., dos Santos E.S.: Fatigue damage analysis in an automobile stabilizer bar. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – D – Journal of Automobile Engineering*, 2002, 216, s. 865-871.
16. Prawoto Y., Ikeda M., Manville S.K., Nishikawa A.: Design and failure modes of automotive suspension springs. *Engineering Failure Analysis*, 2008, 15, s. 696-706.
17. Talarczyk W.: Konstrukcja i działanie kompaktowej brony talerzowej. *Technika rolnicza – ogrodnicza – leśna*, 2007, 2, s. 11-13.
18. Talib A.R.A. (et all.): Developing a composite based elliptic spring for automotive applications. *Materials and Design*, 2010, 31, s. 475-484.
19. Shin J-C. i in.: Correlation of microstructure and fatigue properties of two high-strength spring steels. *International Journal of Fatigue*, 1999, 6, 571-579.
20. Wang Q.Y. i in.: High-cycle Fatigue Crack Initiation and Propagation Behaviour of High-strength Spring Steel Wires. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1999, 8, 673-677.
21. Zebdi O., Boukhili R., Trochu F.: Optimum design of a composite helical spring by multi-criteria optimization. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, 28, s. 1713-1732.

FRACTOGRAPHY AND METALLOGRAPHY EXAMINATION OF SUSPENSION SPRINGS DAMAGES

Summary. In the paper there are presented results of selected properties of a damaged springs from steel that were assembled in vehicles' suspensions. The aim of study was to examine the issue of determining the causes of damage and attempt to systematize them. The direct cause of the fracture, the most frequently observed, was the presence of microcracks beside the fracture on the surface of damaged elements. The complex chemical analysis, macro – and microscopic examination and hardness tests allowed to identify the causes of microcracks in the material even if the chemical composition or the basic analysis of elements hardness were not allowed to indicate the possible causes of damage.

Key words: fracture of spring, microstructure, decarburization