

WITOLD CIOŁEK*

POWTÓRNE PRZYSTANKI PLASTYCZNOŚCI W STALI
ROZCIĄGANEJ Z BARDZO NISKIMI PRĘDKOŚCIAMI
OBCIĄŻENIA

SUBSEQUENT PLASTIC FLOW OF THE STEEL EXTENDED
AT A VERY LOW LOAD SPEEDS

Streszczenie

Artykuł zawiera wyłącznie wyniki doświadczalnego badania krzywej umocnienia stali gatunków 34GS i St3SX przy rozciąganiu z bardzo małymi prędkościami obciążenia w normalnej temperaturze 20°C. Przeprowadzone badania rozpoznawcze wykazały, że w stali 34GS istnieje graniczna prędkość obciążania, przy której jej umocnienie poza granicą plastyczności przebiega skokowo, z sukcesywnymi przystankami plastyczności i progami naprężenia.

Słowa kluczowe: stal, badanie stali, próba rozciągania, niska prędkość obciążania, wyraźna granica plastyczności, przystanek plastyczności, powtórne przystanki plastyczności

Abstract

The paper contains only results of experimental studies concerning the strengthening curve of the steel species 34GS and St3SX, extended at very low speeds load at 20°C. The conducted research has shown that in steel 34GS exists limit speed loading at which the steel strengthening beyond the yield point proceeds in steps, with successively plastic flow separated by threshold stress.

Keywords: steel, steel test, stretch test, loading low speed, apparent yield point, plastic flow, subsequent plastic flow

* Mgr inż. Witold Ciołek, były adiunkt w Instytucie Techniki Budowlanej, Warszawa.

1. Wstęp

W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonego przed laty badania pilotowego stali gatunków 34GS i St3SX na rozciąganie przy bardzo niskich prędkościach obciążenia w temperaturze 20°C. Zasadniczym celem było określenie charakteru przejścia stali przez wyraźną granicę plastyczności i wyznaczenie krzywej umocnienia pod działaniem wolno wzrastającego obciążenia. Istotną była kwestia, czy spowolnienie prędkości obciążenia, a tym samym prędkości wzrostu naprężenia w próbkę ma jakościowy wpływ na zmianę długości przystanku plastyczności i jego przejścia w fazę umocnienia.

W myśl teorii atmosfer Cotrella [1, 3, 4, 6] wyraźna granica plastyczności ujawnia się jako skutek uruchomienia dyslokacji zakotwiczonych przez atomy domieszek, z tym że do oderwania dyslokacji od atmosfer domieszek jest potrzebne większe naprężenie niż potem do utrzymania ich w ruchu. Dowodem na to ma być „ząb” poprzedzający przystanek plastyczności na wykresie rozciągania. Wystąpienie „zęba” zależy od warunków badania i sztywności maszyny wytrzymałościowej – nie wystąpi w maszynach podatnych (typu dynamicznego). W badaniach przyjęto, że jeśli ten mechanizm płynięcia jest słuszny, to przy dostatecznie niskiej prędkości ruchu dyslokacji wywołanej bardzo wolno wzrastającym naprężeniem powinno dojść do skutku dyfuzji atomów domieszek do przegrupowania się atmosfer i ponownego zablokowania dyslokacji, podobnie jak się dzieje w przypadku starzenia po zgnieciu. W takim razie można oczekiwać pojawienia się kolejnego przystanku plastyczności. W krótkotrwałym rozciąganiu nie obserwuje się tego efektu, bo zbyt duża prędkość odkształcania nie pozwala na rozwinięcie mechanizmu ponownego blokowania dyslokacji.

W dostępnych wówczas publikacjach nie natrafiono na badania tego rodzaju. Wyjątkiem była praca [2], której autorzy przedstawili porównanie wyników rozciągania dwóch stali stosowanych w budownictwie przy dwóch różnych prędkościach odkształcania: $6,95 \times 10^{-4}$ i $8,22 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ w maszynie wytrzymałościowej typu kinematycznego z mechanicznym układem wydłużania, niskiej sztywności. Pierwsza prędkość odpowiadała typowym warunkom rozciągania, druga była o 3 rzędy mniejsza – próba rozciągania trwała ponad 480 godzin. Zdaniem autorów zmniejszenie prędkości rozciągania, a tym samym przedłużenie czasu badania prowadziło w porównaniu z próbami krótkotrwałymi do zmiany kształtu wykresów rozciągania i obniżenia: granicy plastyczności (o ok. 15%), wytrzymałości na rozciąganie (ok. 10%) i wydłużenia po zerwaniu (do 40%). W badaniu nie zastosowano bezpośredniego pomiaru wydłużenia próbek, a rzeczywistą prędkość odkształcania określano, o czym napisali autorzy, po uwzględnieniu podatności maszyny, ale z pominięciem pełzania i relaksacji, co negatywnie wpłynęło na wyniki.

Kierując się sugestiami o obniżeniu granicy plastyczności, wybrano do rozciągania stal 34GS powszechnie stosowaną w Polsce do zbrojenia konstrukcji betonowych. Podane w Polskich Normach właściwości mechaniczne stali, niezbędne do projektowania, wyznacza się w krótkotrwałej próbie statycznego rozciągania, na ogół przy ustalonej prędkości odkształcania, i przenosi się do projektowania większości konstrukcji bez szczególnego rozróżniania warunków ich pracy. Jakkolwiek tego rodzaju postępowanie nie budzi zastrzeżeń, to jednak istnieją sytuacje, kiedy obciążenia konstrukcji narastają powoli latami. Mamy z nimi do czynienia w przypadku: parcia górotworów (w górnictwie), osiadania podłoża pod konstrukcją, redystrybucji sił wewnętrznych wskutek pełzania (i skurczu) materiału.

2. Opis aparatury i badań

Próby długotrwałego rozciągania przeprowadzono w Zakładzie Badań Wytrzymałościowych Instytutu Techniki Budowlanej. Do badań wybrano pręty żebrowane $\varnothing 14$ stali 34GS (a następnie pręty gładkie $\varnothing 10$ stali St3SX). Ale tak wolnych przebiegów modelujących zmiany obciążenia w procesach reologicznych nie można było zrealizować w typowych maszynach wytrzymałościowych do prób statycznych. Pierwsze badania przeprowadzono w ramach testowania aparatury przeznaczonej do badania pełzania tej stali w wysokich temperaturach przy zmiennym naprężeniu. Na tej podstawie opracowano program rozciągania próbek z kilkoma poziomami prędkości obciążenia oraz przygotowano aparaturę pomiarową.

Do badania wykorzystano pełzarki ZST B 20/3 (produkcji b. NRD). Są to trzystanowiskowe maszyny pionowe z dwustopniowym układem dźwigni na przegubach nożowych i z grawitacyjnym obciążeniem na szalce. Przekładnia układu dźwigni wynosi 1:100. Pełzarki są przeznaczone do badania próbek w pozycji pionowej, kotwionych w szczękach stożkowych. Górne zakotwienie próbki jest zamocowane do dźwigni obciążenia, dolne zaś do ruchomego trzpienia obciążającego, któremu układ napędowy nadaje prędkość przesuwu równą 0,05 mm/s. Zakres ruchu roboczego trzpienia wynosi ok. 90 mm. Obciążenie na próbkę jest wprowadzane przez mechanizm napędowy, który obniżając dolne zakotwienie próbki, przekazuje siłę na górną dźwignię i unosi szalkę z ustalonym ciężarem. Pochylenie dźwigni jest kontrolowane za pomocą czujników rzęciowych, które sterują przesuwem trzpienia, uruchamiając jego mechanizm napędowy, gdy wychylenie dźwigni wskutek wydłużeń próbki osiągnie graniczne dolne lub górne położenie.

Całkowita długość próbek między zakotwieniami wynosi 2160 mm. Do pomiaru odkształceń każdej próbki służą dwa tensometry o długości bazy 2000 mm, z czujnikami zegarowymi o zakresie 3 mm i działce elementarnej 0,01 mm. Tensometry zawieszają się na standardowych uchwytach montowanych na próbce. Wskazania czujników rejestrowano manualnie. Przy tej długości próbki ruch trzpienia obciążającego ze stałą prędkością 0,05 mm/s daje prędkość odkształcenia równą $5 \times 10^{-2} / 2160 \approx 2,3 \times 10^{-5} / s$, czyli prędkość obciążania w zakresie sprężystym ok. 4,5 MPa/s. Zakres jego przesuwu pozwala nadać próbce odkształcenie 90/2160, tj. ok. 4%.

Modelowanie stałej prędkości obciążania realizowano przez dosypywanie na szalkę w regularnych odstępach czasu stalowych kulek łożyskowych o średnicy $\varnothing 5$ mm i średniej masie ok. 0,514 g. Zadanie to pełnił elektromechaniczny dozownik. Składał się on z zasobnika, wybieraka i rzutnika kulek oraz generatora impulsów elektrycznych. Kulki wpadały do pojemnika umieszczonego na szalce obciążenia. Częstość ich mogła być programowana, co dawało możliwość sterowania szybkością obciążenia. Kulka dorzucona na szalkę wywoływała przyrost siły rozciągającej w próbce 0,504 N. Kulki o tej masie, spadając z niewielkiej wysokości do pojemnika o dużej masie, nie wywoływały efektów dynamicznych. Realizowane w ten sposób obciążenie można uznać za dobre przybliżenie wzrostu ciągłego przy każdej częstości. Zresztą jest to ogólnie stosowana w technice metoda porcjowania nie tylko obciążenia. Dla porównania warto podać, że dorzucając co sekundę jedną kulkę, uzyskiwano prędkość obciążenia ok. 20 razy mniejszą od minimalnej prędkości obciążenia w INSTRONIE serii 8033 sterowanej komputerowo.

Obciążenie każdej próbki było dwuczściowe: składało się z obciążenia wstępnego o dobranym poziomie (w stosunku do granicy plastyczności) oraz obciążenia dozowanego kul-

kami powyżej obciążenia wstępnego. Obciążenie wstępne wprowadzano na próbki w sposób statyczny za pomocą mechanizmu napędowego pełzarki (trwało to kilka minut) i niezwłocznie uruchamiano dozowanie kulek. W czasie obciążania można było mierzyć wydłużenia próbki, a po zastosowaniu siłomierza pod szalką z obciążeniem można było także wyznaczać odkształcenia przy odciążaniu i powtórnym obciążaniu próbki.

Już podczas badania pierwszych próbek zauważono osobliwości w przebiegu wydłużeń. Po okresie powolnego przyrostu mieliśmy do czynienia z nagłym, niemal skokowym wzrostem odkształceń. Wtedy pomiary wykonywano częściej. Ale w braku automatycznej rejestracji nie zawsze udało się trafić na czas nagłego ich przyrostu, np. w porach nocnych lub w czasie dłuższej nieobecności w laboratorium. Pomiary wykonane później wykazywały, że nastąpił skok wydłużenia, ale nie pozwalały precyzyjnie ustalić chwili jego początku i zakończenia.

Równoległe z prowadzeniem badania powolnego rozciągania przeprowadzono w celach porównawczych próby statycznego rozciągania w skomputeryzowanej maszynie wytrzymałościowej typu INSTRON serii 8033, stosując minimalną, możliwą do osiągnięcia, prędkość odkształcania lub minimalną prędkość obciążania. W celach porównawczych wykonano też w pełzarkach odpowiednie próby rozciągania, stosując częste dozowanie kulek.

Pola przekroju próbek wyznaczano metodą wagową na podstawie masy całej próbki o długości ok. 2280 mm i tę wartość przyjęto do obliczania naprężenia. Tak więc w polach przekroju próbek zawierają się pola przekrojów żeber. W badaniu każdej serii próbek stosowano jednakową częstość dozowania kulek, co przy istniejących różnicach pól przekrojów prowadziło do niewielkich różnic prędkości naprężenia umownego poszczególnych próbek.

W tabeli 1 podano skład chemiczny stali obu gatunków wybranych do badania. Zawartość poszczególnych składników spełnia wymagania ówczesnych norm PN-74/H-93215 i PN-89/H-84023/06.

Tabela 1

Skład chemiczny stali 34GS i St3SX

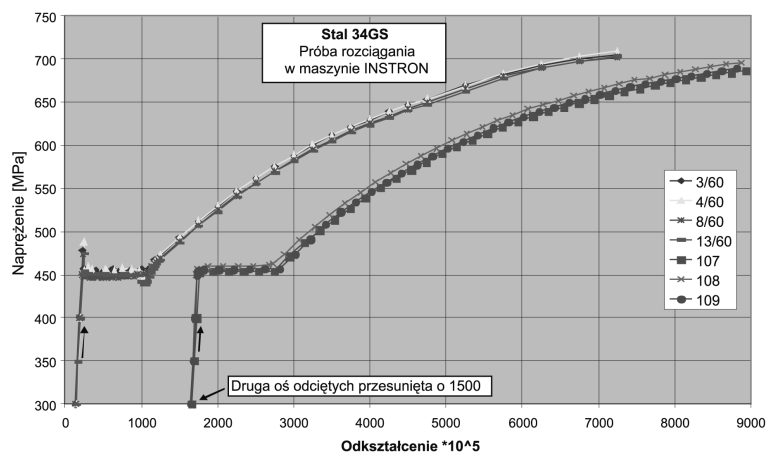
| Gatunek stali | Numer próbki | Zawartość składników [%] | | | | | | | |
|---------------|--------------|--------------------------|------|------|-------|---------------|------|------|------|
| | | C | Mn | Si | S | Cr | Ni | Mo | Cu |
| 34GS | 8/14 | 0,34 | 0,90 | 0,66 | 0,027 | 0,08 | 0,6 | 0,01 | 0,16 |
| | 12/14 | 0,35 | 1,05 | 0,64 | 0,032 | 0,08 | 0,6 | 0,01 | 0,16 |
| | 6/15 | 0,33 | 0,98 | 0,40 | 0,028 | 0,15 | 0,12 | 0,02 | 0,15 |
| St3SX | 200 | 0,19 | 0,62 | 0,05 | 0,024 | Nie określano | | | |
| | 210 | 0,22 | 0,75 | 0,07 | 0,021 | | | | |

3. Prezentacja wyników badania stali 34GS

Na rysunku 1 przedstawiono wykresy rozciągania stali 34GS uzyskane w maszynie wytrzymałościowej INSTRON serii 8033 odpowiednio przy stałej minimalnej prędkości odkształcania lub stałej minimalnej prędkości obciążania. Badaniom poddano próbki nieobrobione długości 200 mm. W celu ułatwienia porównania wykresy przedstawiono w jednym układzie współrzędnych, z osią poziomą odkształcania i pionową naprężenia. W badaniach, gdzie zmienną niezależną jest obciążenie, osią poziomą powinno być naprężenie. W obu przypadkach wartości granicy plastyczności, przystanki plastyczności i kształt krzywych umocnienia są zgodne z odpowiednimi wielkościami uzyskiwaną w krótkotrwałej próbie statycznego rozciągania (kilka razy krótszej) – krzywe umocnienia są gładkie, rosnące, z tym że na wykresach rozciągania ze stałą prędkością obciążania nie obserwuje się, co zrozumiałe, rozróżnienia górnej i dolnej granicy plastyczności.

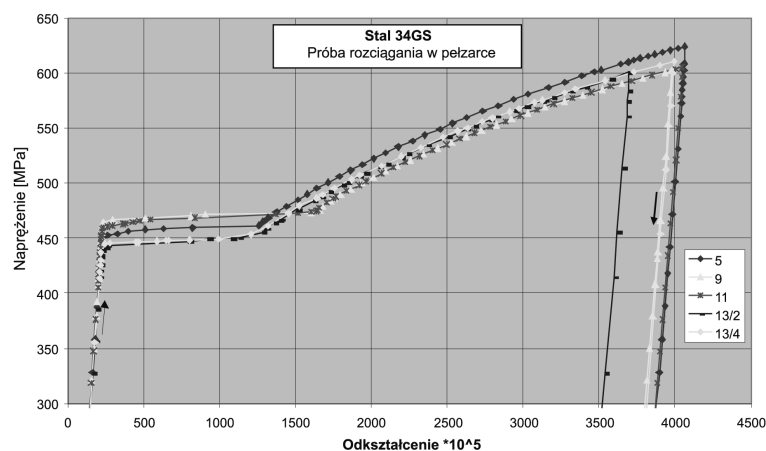
Na rysunku 2 podano wykresy rozciągania przeprowadzonego w pelzarkach z prędkością obciążenia odpowiednio o ponad rząd i trzy rzędy mniejszą niż na rysunku 1. Tu też nie obserwuje się żadnych istotnych zmian w kształcie przystanku plastyczności i wstępnego odcinka krzywej umocnienia. Można przy tej sposobności zauważyć, że opracowana metodyka badania rozciągania z użyciem pelzarek może być uznana za niebudzącą zastrzeżeń merytorycznych.

Rozpatrzmy obciążanie próbek kulkami z jeszcze mniejszą częstością. Na rysunkach 3, 4 i 5 zamieszczono wykresy rozciągania 11 próbek. Przyrost obciążenia realizuje się z częstością 1 kulki na minutę, co daje dobowy przyrost naprężenia w próbkach ok. 4,5 MPa. Dokładne wartości prędkości obciążenia i przedziału naprężenia dla każdej próbki znajdują się w podpisach pod rysunkami. Czas badania w podanych przedziałach naprężenia wynosi od 40 do 60 dni. Drobne różnice prędkości naprężenia wynikają z różnic pól przekrojów poprzecznych próbek. Na rysunkach można zauważyć jakościową zmianę kształtu wykresów umocnienia – w miejsce krzywych gładkich pojawiły się krzywe faliste i schodkowe z powtarzającymi się przystankami plastyczności i progami naprężenia. Tak też przebiegało rozciąganie obserwowane w laboratorium – po szybkim płynięciu plastycznym następowało spowolnienie odkształceń i umocnienie próbki. Gdy naprężenie osiągało określoną wartość, cykl się powtarzał. Efekt ten można dostrzec na wykresach. W niektórych próbkach kształt schodkowy nie jest jeszcze zbyt ostro zarysowany. W pełni schodkowy kształt umocnienia stali 34GS osiąga się przy prędkości 5 razy mniejszej, tj. jednej kulce co 5 minut. Odpowiednie wykresy przedstawiono na rysunkach 6–9. Trzeba dodać, że nachylenie progów naprężenia odpowiada nachyleniu w zakresie sprężystym (proste a, b, c, d, e są równoległe) na rysunkach 7, 8 i 9.



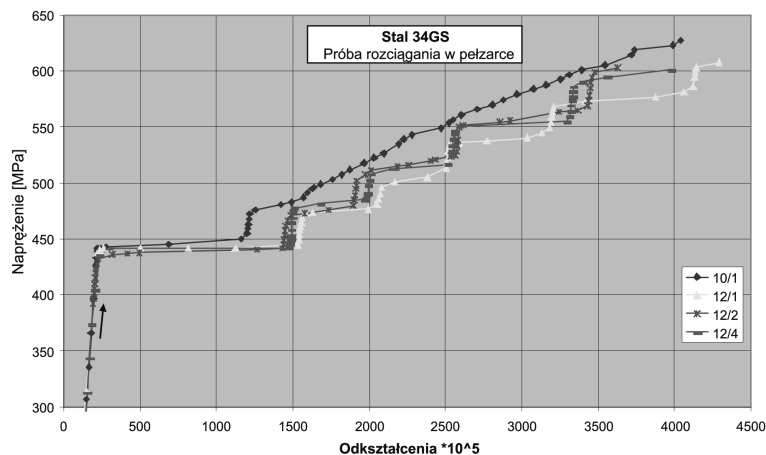
Rys. 1. Wykresy rozciągania próbek: 3/60, 4/60, 8/60 i 13/60 z prędkością odkształcania $1,225 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ w całym zakresie, 107, 108 i 109 – z prędkością obciążenia $0,7 \text{ MPa/s}$ do 420 MPa i $0,06365 \text{ MPa/s}$ powyżej

Fig. 1. Stress-strain curves of samples extended: 3/60, 4/60, 8/60 and 13/60 – at the speed of deformation $1.225 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ over the entire range, 107, 108 and 109 – at the speed of load 0.7 MPa/s to 420 MPa and 0.06365 MPa/s above



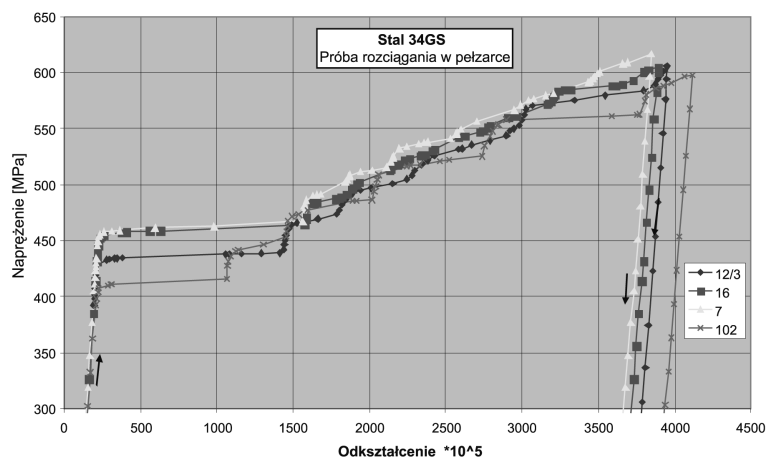
Rys. 2. Wykresy rozciągania z prędkością obciążania próbek 5, 9 i 11 (jedna kulka co $0,5 \text{ s}$) i 13/2 i 13/4 (jedna kulka co 30 s): 5 – $0,00577 \text{ MPa/s}$ od $441,7$ do $624,3 \text{ MPa}$, 9 – $0,00589 \text{ MPa/s}$ od $431,5$ do $602,5 \text{ MPa}$, 11 – $0,00585 \text{ MPa/s}$ od $434,1$ do $605,5 \text{ MPa}$, 13/2 – $9,63 \times 10^{-5} \text{ MPa/s}$ od $432,3$ do $600,7 \text{ MPa}$, 13/4 – $9,90 \times 10^{-5} \text{ MPa/s}$ od $436,8$ do $610,7 \text{ MPa}$

Fig. 2. Stress-strain curves of samples tensile at the speed of load (5, 9 and 11 – one ball every 0.5 seconds, 13/2 and 13/4 – one ball every 30 seconds): 5 – 0.00577 MPa/s from 441.7 to 624.3 MPa , 9 – 0.00589 MPa/s from 431.5 to 602.5 MPa , 11 – 0.00585 MPa/s from 434.1 to 605.5 MPa , 13/2 – $9.63 \times 10^{-5} \text{ MPa/s}$ from 432.3 to 600.7 MPa , 13/4 – $9.90 \times 10^{-5} \text{ MPa/s}$ from 436.8 to 610.7 MPa



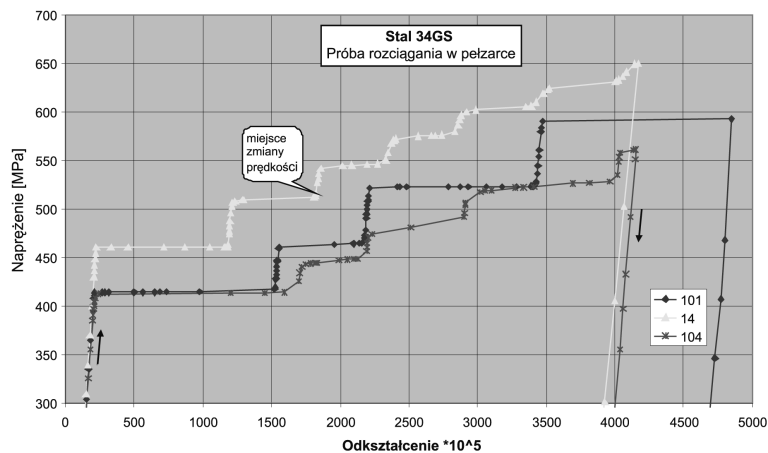
Rys. 3. Wykresy rozciągania z prędkością obciążania (jedna kulka na minutę) próbek: 10/1 – 4,5522 MPa/d od 438,7 do 627,4 MPa, 12/2 – 4,3836 MPa/d od 392,3 do 603,0 MPa, 12/1 – 4,5503 MPa/d od 441,3 do 607,7 MPa, 12/4 – 4,4130 MPa/d od 441,3 do 601,0 MPa. Próbkki 12/1 i 12/4 weszły w granicę plastyczności przy obciążeniu wstępnym

Fig. 3. Stress-strain curves of samples tensile at the speed of load (1 ball per minute): 10/1 – 4.5522 MPa/d from 438.7 to 627.4 MPa, 12/2 – 4.3836 MPa/d from 392.3 to 603.0 MPa, 12/1 – 4.5503 MPa/d from 441.3 to 607.7 MPa, 12/4 – 4.4130 MPa/d from 441.3 to 601.0 MPa. Samples 12/1 and 12/4 came in the yield on the initial load



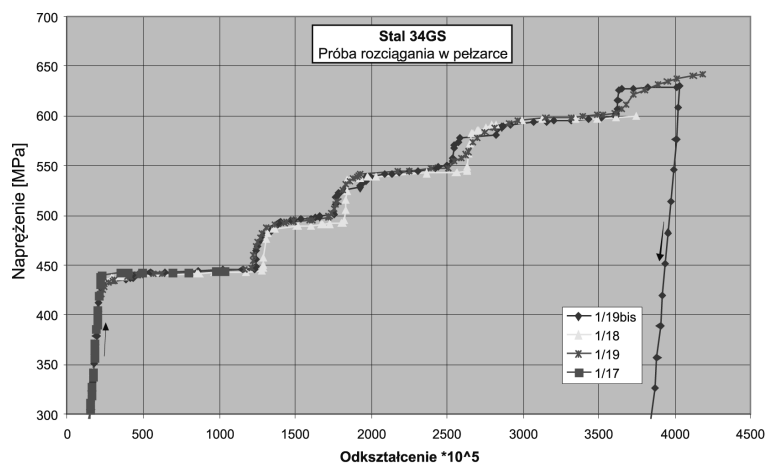
Rys. 4. Wykresy rozciągania z prędkością obciążania (jedna kulka na minutę) próbek: 12/3 – 4,5522 MPa/d od 392,5 do 605,5 MPa, 16 – 4,3154 MPa/d od 431,4 do 600,5 MPa, 7 – 4,1681 MPa/d od 422,6 do 616,8 MPa, 102 – 4,4676 MPa/d od 398,5 do 597,7 MPa

Fig. 4. Stress-strain curves of samples stretched at the speed of load (1 ball per minute): 12/3 – 4.5522 MPa/d from 392.5 to 605.5 MPa, 16 – 4.3154 MPa/d from 431.4 to 600.5 MPa, 7 – 4.1681 MPa/d from 422.6 to 616.8 MPa, 102 – 4.4676 MPa/d from 398.5 to 597.7 MPa



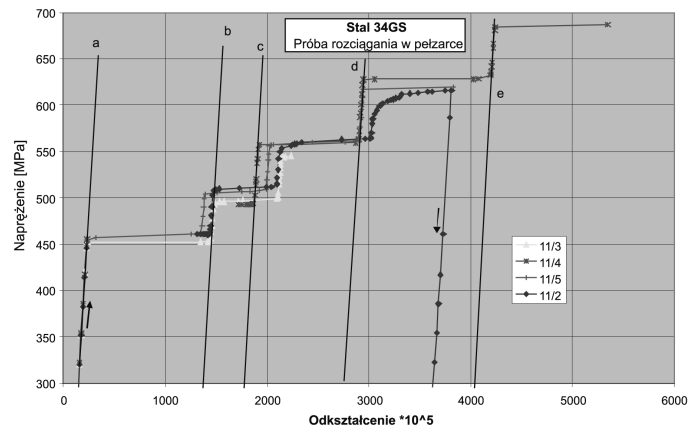
Rys. 5. Wykresy rozciągania z prędkością obciążania (jedna kulka na minutę) próbek: 101 – 4,4778 MPa/d od 401,5 do 592,6 MPa, 14 – 0,8972 MPa/d (tu jedna kulka co 5 minut) od 460,6 do 515,8 MPa i 4,4861 MPa/d od 518,5 do 650,2 MPa, 104 – 4,3831 MPa/d od 384,8 do 551,6 MPa

Fig. 5. Stress-strain curves of samples extended at the speed of load (1 ball per minute): 101 – 4.4778 MPa/d from 401.5 to 592.6 MPa, 14 – 0.8972 MPa/d (here, 1 ball every 5 minutes) from 460.6 to 515.8 MPa and 4.4861 MPa/d from 518.5 to 650.2 MPa, 104 – 4.3831 MPa/d from 384.8 to 551.6 MPa



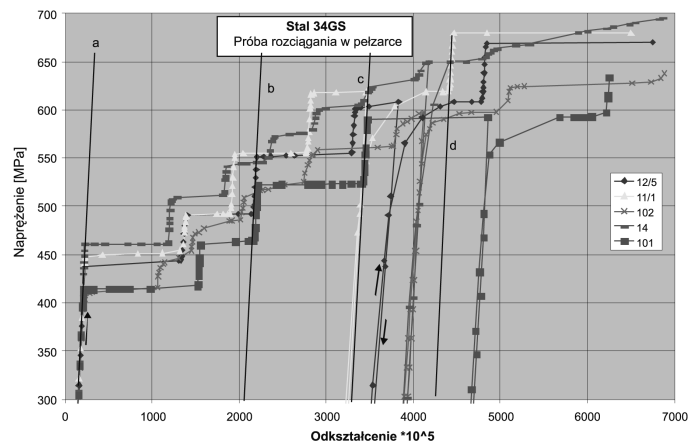
Rys. 6. Wykresy rozciągania z prędkością obciążania (jedna kulka co 5 minut) próbek: 1/19bis – 0,9405 MPa/d od 294,5 do 630,3 MPa, 1/18 – 0,9542 MPa/d od 294,9 do 599,1 MPa, 1/19 – 0,9571 MPa/d od 420,4 do 641,5 MPa, 1/17 – 0,9571 MPa/d od 294,6 do 444,0 MPa

Fig. 6. Stress-strain curves of samples tensile at the speed of load (1 ball every 5 minutes): 1/19bis – 0.9405 MPa/d from 294.5 to 630.3 MPa, 1/18 – 0.9542 MPa/d from 294.9 to 599.1 MPa, 1/19 – 0.9571 MPa/d from 420.4 to 641.5 MPa, 1/17 – 0.9571 MPa/d from 294.6 to 444.0 MPa



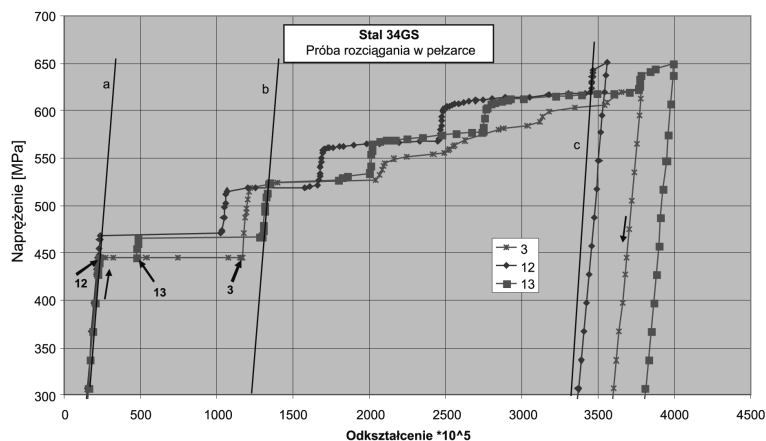
Rys. 7. Wykresy rozciągania z prędkością obciążania (jedna kulka co 5 minut) próbka: 11/3 – 0,8826 MPa/d od 452,6 do 545,2 MPa, 11/4 – 0,9905 MPa/d od 492,9 do 686,7 MPa, 11/5 – 0,9581 MPa/d od 461,1 do 619,4 MPa, 11/2 – 0,9905 MPa/d od 460,9 do 615,7 MPa. Nachylenie progów jest stałe – proste b, c, d, e są równoległe do prostej a

Fig. 7. Stress-strain curves of samples tensile at the speed of load (1 ball every 5 minutes): 11/3 – 0.8826 MPa/d from 452.6 to 545.2 MPa, 11/4 – 0.9905 MPa/d from 492.9 to 686.7 MPa, 11/5 – 0.9581 MPa/d from 461.1 to 619.4 MPa, 11/2 – 0.9905 MPa/d from 460.9 to 615.7 MPa. The slope threshold stress is constant – the samples b, c, d, e are parallel to the line a



Rys. 8. Wykresy rozciągania z krótkim odciążeniem pośrednim. Prędkość obciążania próbek 12/5 i 11/1 (jedna kulka co 5 minut) oraz 102, 14 i 101 (jedna kulka na minutę): 12/5 – 0,9117 MPa/d od 443,5 do 669,7 MPa, 11/1 – 0,9802 MPa/d od 445,1 do 679,5 MPa, 102 – 4,4676 MPa/d od 398,5 do 637,9 MPa, 14 – 0,8972 MPa/d (jedna kulka co 5 minut) od 460,6 do 515,8 MPa i 4,4861 MPa/d (jedna kulka na minutę) od 518,5 do 710,4 MPa, 101 – 4,4778 MPa/d od 401,5 do 633,3 MPa. Nachylenie progów jest stałe – proste b, c, d są równoległe do prostej a

Fig. 8. Stress-strain curves with a short relief intermediary. Speed of load of samples 12/5 and 11/1 (1 ball every 5 minutes), samples 102, 14 and 101 (1 ball per minute): 12/5 – 0.9117 MPa/d from 443.5 to 669.7 MPa, 11/1 – 0.9802 MPa/d from 445.1 to 679.5 MPa, 102 – 4.4676 MPa/d from 398.5 to 637.9 MPa, 14 – 0.8972 MPa/d (1 ball every 5 minutes) from 460.6 to 515.8 MPa and 4.4861 MPa/d (1 ball per minute) from 518.5 to 710.4 MPa, 101 – 4.4778 MPa/d from 401.5 to 633.3 MPa. The slope threshold stress is constant – the samples b, c and d are parallel to the line a



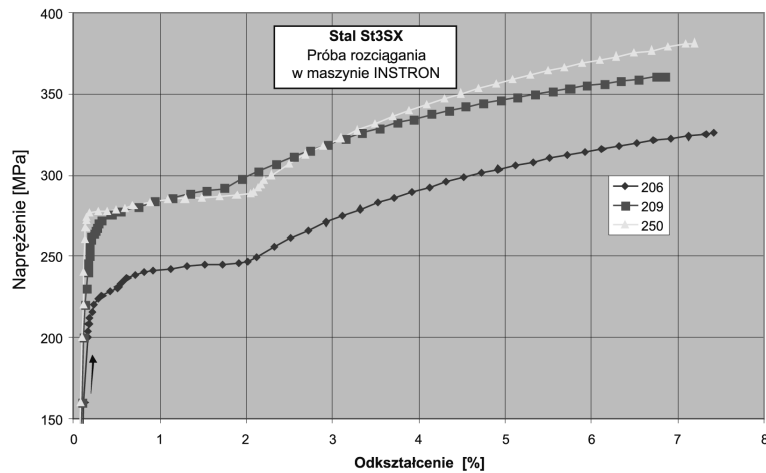
Rys. 9. Wykresy rozciągania próbek 3, 12 i 13. Pozostawiały one pod naprężeniem 444,9 MPa (grubymi strzałkami wskazano, jakie odkształcenie miała każda z nich przy tym naprężeniu) odpowiednio przez 921, 763 i 729 dni, a następnie poddano je powolnemu rozciąganiu z prędkością: 3 – 4,3885 MPa/d od 444,9 do 624,2 MPa (jedna kulka na minutę), 12 – 0,9640 MPa/d od 444,9 do 629,7 MPa (jedna kulka co 5 minut), a potem 4,3345 MPa/d do 651,3 MPa (jedna kulka na minutę), 13 – 0,9826 MPa/d od 444,9 do 626,8 MPa (jedna kulka co 5 minut), a potem 4,3051 MPa/d do 649,8 MPa (jedna kulka na minutę). Nachylenie progów jest stałe – proste a, b, c są równoległe

Fig. 9. Stress-strain curves of samples 3, 12 and 13. They remained under a stress of 444.9 MPa (thick arrows indicated that the strain had each of them at the same strain), respectively, by 921, 763 and 729 days, and then subjected to a slow stretch at a speed of: 3 – 4.3885 MPa/d from 444.9 to 624.2 MPa (1 ball per minute) 12 – 0.9640 MPa/d from 444.9 to 629.7 MPa (1 ball every 5 minutes) and then 4.3345 MPa/d to 651.3 MPa (1 ball per minute) 13 – 0.9826 MPa/d from 444.9 to 626.8 MPa (1 ball every 5 minutes) and then 4.3051 MPa/d to 649.8 MPa (1 ball per minute). The slope threshold stress is constant – the simple b, c are parallel to the line a

4. Prezentacja wyników badania stali St3SX

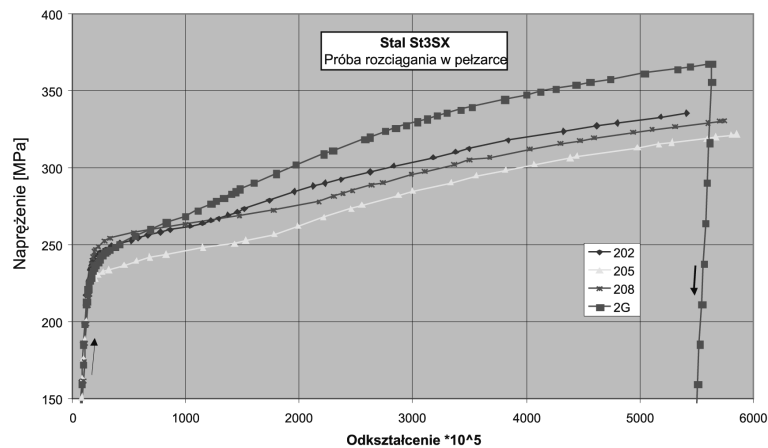
W celu sprawdzenia, czy inne stale odkształcają się skokowo przy powolnym obciążaniu, przeprowadzono testowe badania stali St3SX z użyciem tej samej aparatury, wprowadzając niezbędne zmiany w szybkości dozowania kulek. Z powodów pozamerytorycznych zakres badań został znacznie zawężony.

Na rysunku 10 przedstawiono wykresy rozciągania z minimalną możliwą do uzyskania w maszynie INSTRON serii 8033 prędkością 0,065 MPa/s. Stal St3SX nie ma wyraźnej granicy plastyczności. Krzywe rozciągania w stadium umocnienia są gładkie, ale występują dwa stadia umocnienia plastycznego. Na rysunku 11 zamieszczono wykresy rozciągania z prędkością o rząd mniejszą w przybliżeniu niż na rys. 10 – nadal krzywe umocnienia są gładkie i mają stałe, niewielkie nachylenie. Na rysunku 12 podano krzywe rozciągania trzech próbek 1C, 1G i 2C. Dwie pierwsze są rozciągane z prędkością 120 razy mniejszą, a trzecia 300 razy mniejszą niż próbki z rys. 11. Przy tej prędkości obciążania stal St3SX wykazuje wydatne wzmocnienie. Dla odmiany na krzywych rozciągania z jeszcze mniejszą prędkością (rys. 13) można zaobserwować odcinki poślizgów plastycznych rozdzielone drobnymi, nieregularnymi skokami (ząbkami).



Rys. 10. Wykresy rozciągania z prędkością obciążania 0,065 MPa/s przy naprężeniu ponad 200 MPa

Fig. 10. Stress-strain curves of the steel of specie St3SX extended at the speed of load 0.065 MPa/s at the stress above 200 MPa

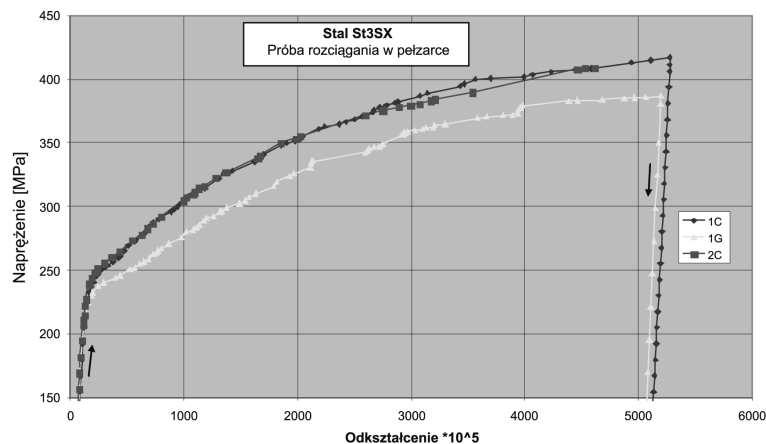


Rys. 11. Wykresy rozciągania w pelzarce. Prędkość obciążania (jedna kulka na sekundę):

202 – $6,217 \times 10^{-3}$ MPa/s od 217,2 do 335,4 MPa, 205 – $6,306 \times 10^{-3}$ MPa/s od 225,5 do 321,7 MPa,
208 – $6,026 \times 10^{-3}$ MPa/s od 210,5 do 330,5 MPa, 2G – $6,596 \times 10^{-3}$ MPa/s od 211,5 do 367,8 MPa

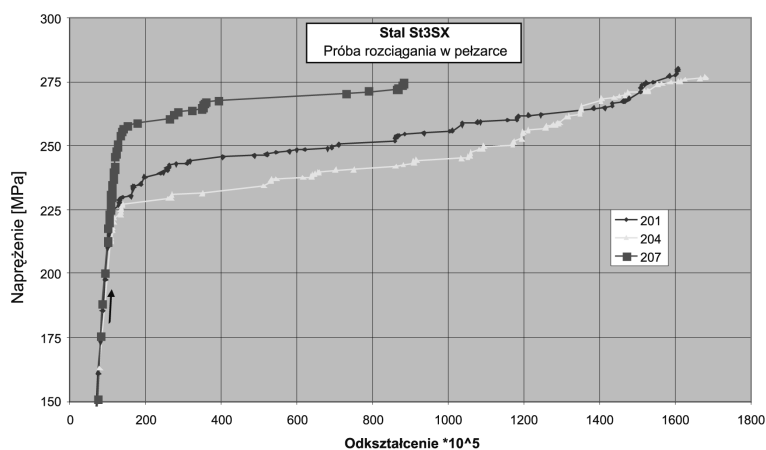
Fig. 11 Stress-strain curves of samples stretched at the speed of load (ball per second):

202 – 6.217×10^{-3} MPa/s from 217.2 to 335.4 MPa, 205 – 6.306×10^{-3} MPa/s from 225.5 to 321.7 MPa,
208 – 6.026×10^{-3} MPa/s from 210.5 to 330.5 MPa, 2G – 6.596×10^{-3} MPa/s from 211.5 to 367.8 MPa



Rys. 12. Wykresy rozciągania z prędkością obciążania próbek 1C i 1G (jedna kulka co 5 minut) i próbki 2C (jedna kulka co 2 minuty): 1C – 1,863 MPa/d od 204,6 do 416,7 MPa, 1G – 1,914 MPa/d od 208,8 do 386,7 MPa, 2C – 4,733 MPa/d od 207,4 do 408,8 MPa

Fig. 12. Stress-strain curves of steel St3SX expended at the speed of load: samples 1C and 1G (1 ball every 5 minutes) and sample 2C (1 ball every 2 minutes): 1C – 1.863 MPa/d from 204.6 to 416.7 MPa, 1G – 1.914 MPa/d from 208.8 to 386.7 MPa, 2C – 4.733 MPa/d from 207.4 to 408.8 MPa



Rys. 13. Wykresy rozciągania z prędkością obciążania próbek 201 i 204 (jedna kulka co 10 minut) i próbki 207 (jedna kulka co 7,5 minuty): 201 – 0,899 MPa/d od 209,9 do 280,1 MPa, 204 – 0,908 MPa/d od 212,5 do 276,9 MPa, 207 – 1,216 MPa/d od 212,5 do 274,6 MPa

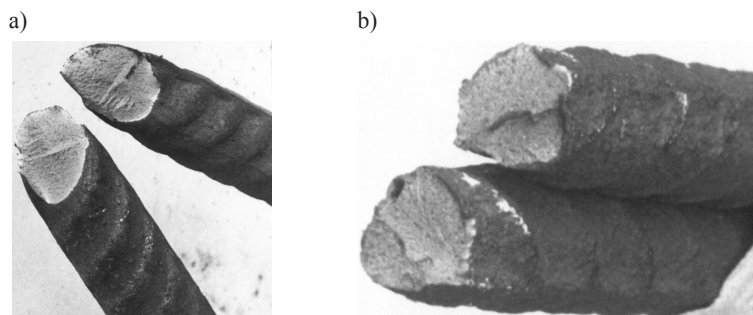
Fig. 13 Stress-strain curves of steel St3SX stretched at the speed of load: samples 201 and 204 (1 ball every 10 minutes) and sample 207 (1 ball every 7.5 minutes): 201 – 0.899 MPa/d from 209.9 to 280.1 MPa, 204 – 0.908 MPa/d from 212.5 to 276.9 MPa, 207 – 1.216 MPa/d from 212.5 to 274.6 MPa

5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań rozpoznawczych można sformułować następujące wnioski:

1. Dla niskostopowej stali 34GS o podwyższonej wytrzymałości i wyraźnej granicy plastyczności istnieje graniczna prędkość obciążenia, przy której krzywa umocnienia poza granicą plastyczności przechodzi z postaci gładkiej w krzywą schodkową z powtarzającymi się przystankami plastyczności. Wydaje się, że tego efektu należy szukać w przedziale prędkości $(10 \div 5) \times 10^{-5}$ MPa/s. Przy niższych prędkościach obciążania kształt schodkowej krzywej staje się wyraźny, chociaż istnieją próbki, dla których załamania wykresu są wyoblone. Niektóre wyoblenia krzywych są spowodowane brakiem pomiarów wydłużeń w właściwym czasie, np. w próbce 104 na rys. 5.
2. W stali 34GS obserwuje się kolejne przystanki plastyczności przy coraz wyższych naprężeniach, niezależnie od poziomu naprężenia, przy którym rozpoczęto powolne obciążanie (poniżej, powyżej lub na wyraźnej granicy plastyczności). Efekt ten występuje też w próbkach po krótkotrwałym odciążeniu (na ok. 2 godziny) i ponownym obciążaniu. Schodkowy kształt umocnienia wykazują także próbki, które przez ponad dwa lata były poddane stałym obciążeniom i potem powolnie dociążane (por. rys. 9).
3. Przedstawione wykresy stali 34GS pozwalają na wizualną ocenę długości kolejnych przystanków plastyczności (czyli płynięcia) i wysokości progów (czyli naprężenia); wydaje się, że wysokość progów maleje w miarę wzrostu odkształcenia. Można zauważyć regularne nachylenie wszystkich progów do osi odkształcenia, identyczne do nachylenia prostych w zakresie sprężystym.
4. Nasuwa się też wniosek, że kolejne przystanki plastyczności tworzą się w wyniku tego samego mechanizmu, który odpowiada za powstanie wyraźnej granicy plastyczności. Pojawia się ona wg teorii atmosfer Cottrella [4, 6] w wyniku odblokowania i uruchomienia przez obciążenie zewnętrzne dyslokacji zakotwiczonej przez atomy domieszek. Po zakończeniu płynięcia plastycznego w rozciąganiu krótkotrwałym stal się umacnia, o czym świadczy załamanie krzywej rozciągania w górę. Jednak w próbie krótkotrwałej szybkość odkształcenia jest zbyt duża na to, aby atomy domieszek mogły zablokować ruchome dyslokacje, których gęstość wzrasta. W badaniu powolnym istnieje taka możliwość. W czasie wzrostu naprężenia między kolejnymi poślizgami, podobnie jak podczas starzenia po zgnioście (gdy odpoczynek próbki dłuższy) trwa proces dyfuzji atomów domieszek i blokowania dyslokacji. Każdy kolejny przystanek plastyczności, podobnie jak pierwszy odpowiadający za wyraźną granicę plastyczności, kończy się kolejnym wzmocnieniem. Cykle się powtarzają.
5. Również w stali węglowej konstrukcyjnej zwykłej jakości ogólnego przeznaczenia St3SX, niemającej wyraźnej granicy plastyczności, obserwuje się powstawanie skoków naprężenia i odpowiadających im poślizgów, z tym że efekt ten nie ma tak wyraźnej postaci, jak w stali 34GS. Schodki są nieregularne, drobniejsze i liczniejsze, a wykresy rozciągania powyżej zakresu sprężystego są prawie poziome. Może do uzyskania wyraźniejszego efektu należałoby zmniejszyć prędkość obciążania albo może mamy w tej stali do czynienia z efektem Portevina-Le Chateliera, który się tłumaczy tym samym mechanizmem atmosfer Cottrella.
6. Nie stwierdzono ujemnego wpływu niskiej prędkości obciążenia na granicę plastyczności stali 34GS, występujące różnice należy raczej interpretować rozrzutem właściwości

poszczególnych próbek. Warto tu dodać, że cztery próbki tej stali doprowadzone po odciążeniu do odkształcenia ok. 7% uległy zerwaniu bez przewężenia, z typowo kruchym przełomem (rys. 14).



Rys. 14. Przełomy kruche stali gatunku 34GS rozciąganej z prędkością obciążenia ok. 4,5 MPa/d: a) próbka 101 – przy ok. 6,5%, b) próbka 102 – przy ok. 7%

Fig. 14. Breakthroughs fragile steel specie 34GS expanded at a speed of load approximately 4.5 MPa/d: a) sample 101 – at about 6.5%, b) sample 102 – at about 7%

7. Trzeba na koniec dodać, że przeprowadzone badania nie dają wiarygodnej podstawy do wnioskowania statystycznego. Podjęte próby były wycinkowe i z konieczności zostały nagle zakończone. Do sformułowania związków ilościowych i odpowiedzi na pytanie, czy inne gatunki stali mają analogiczne właściwości, należałoby przeprowadzić dalsze badania.

Autor zachowuje we wdzięcznej pamięci wszystkie osoby, które służyły mu radą i pomocą.

Literatura

- [1] Friedel J., *Dislokacji*, Izd. „Mir”, Moskwa 1967.
- [2] Baddin W.A., Potapow W.N., *Mietydy opredielenija mechanicznych swojstw stali i osobienosti ee powiedienija pri nizkich skorostjach deformirowanija*, Zawodskaja Laboratorija 5/1981.
- [3] Bernsztejn M.L., Zajmowski W.A., *Struktura i własności mechaniczne metali*, WNT, Warszawa 1973.
- [4] Przybyłowicz K., *Strukturalne aspekty odkształcania metali*, WNT, Warszawa 2002.
- [5] Wyrzykowski J.W., Makieła Z., Świdorska A., *Odształcenie plastyczne polikrystalicznych metali*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
- [6] Wyrzykowski J.W., Pleszakow E., Sieniawski J., *Odształcanie i pękanie metali*, WNT, Warszawa 1999.
- [7] Staub F i in., *Metaloznawstwo*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1979.