

JÓZEF KŁAPUT*

PRÓBA UJAWNIEŃIA EFEKTU BAUSCHINGERA
ZA POMOCĄ NIEKONWENCJONALNEJ METODY
*SMALL PUNCH TEST (SPT)*THE ATTEMPT TO DISCLOSE BAUSCHINGER EFFECT
BY SMALL PUNCH TEST METHOD

Streszczenie

W artykule opisano próbę zastosowania niekonwencjonalnej metody badania materiałów do ujawnienia efektu Bauschingera w materiałach metalowych. Badania prowadzono dla stali austenitycznej typu 18-9 i ferrytyczno-perlitycznej 41Cr4. Porównano wyniki otrzymane metodami konwencjonalnymi oraz za pomocą próby SPT. Dla próbek, dla których znaki składowych odkształcenia pierwotnego i wtórnego są przeciwne, zaobserwowano inny przebieg krzywych SPT niż w próbkach poddanych tylko jednostajnemu obciążeniu aż do zniszczenia. Na krzywych obciążenie–przemieszczenie ujawniają się charakterystyczne odcinki i punkty typowe dla materiałów ulegających uplastycznieniu przy niskich wartościach naprężeń.

Słowa kluczowe: niekonwencjonalna metoda small punch test, efekt Bauschingera, uplastycznienie, rozciąganie

Abstract

The text presents an attempt to apply the unconventional small punch test method in metal components to disclose the Bauschinger effect. The research was done with the use of austenitic and ferrite-perlite steel. The Bauschinger effect was tested conventional and unconventional SPT methods. The results obtained were compared. The small punch test charts, for specimens not deformed, differ from the charts for the specimens for which the signs of deformation components are contrary. Characteristic segments and points typical for materials which have a low yield point appeared on load deflection curves.

Keywords: unconventional small punch test method, Bauschinger effect, deformability, tensile strength

* Dr inż. Józef Kłaput, Instytut Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

W artykule podjęto próbę ujawnienia efektu Bauschingera za pomocą niekonwencjonalnej metody *small punch test* (SPT) dla wybranych dwóch stali.

Profesor Johann Bauschinger to jeden z pierwszych badaczy zajmujących się wpływem deformacji materiałów metalowych na ich właściwości. Był założycielem „Narodowego biura badań materiałów dla budowy maszyn” w Monachium, którym kierował w latach 1868–1893 i które działa po dziś dzień.

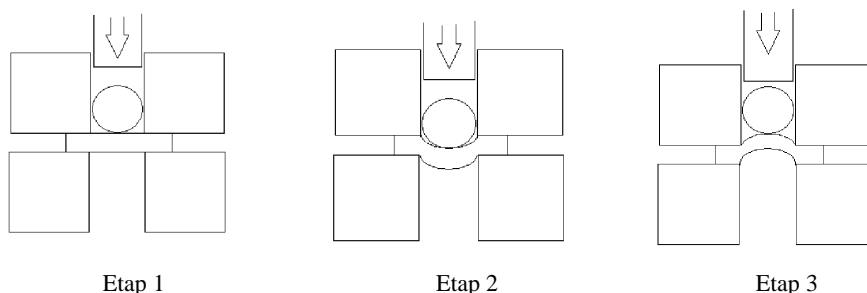
W 1886 roku zaobserwował, że uplastycznienie materiałów metalowych występuje przy mniejszych wartościach naprężenia, jeżeli wcześniej próbki poddano niewielkim naprężeniom plastycznym przeciwnego znaku. Zjawisko to zostało nazwane efektem Bauschingera na cześć jego odkrywcy. Od momentu tej obserwacji określenie „efekt Bauschingera” zaczęło odnosić się nie tylko do zmniejszenia naprężenia plastycznego pod wpływem odciążenia, ale również obejmuje wszelkie zmiany w plastyczności spowodowane przez zmiany naprężenia.

Metoda SPT jest jedną z bardziej obiecujących metod badania właściwości materiałów metalowych. Badania przeprowadza się na próbkach w formie minikążków. Niewielka ilość materiału potrzebnego do badań pozwala na stosowanie tej metody szczególnie do monitorowania zmian właściwości materiałów w urządzeniach pracujących w sposób ciągły.

2. Sposób przeprowadzenia badań

Do ujawnienia efektu Bauschingera wybrano dwie stale różniące się właściwościami i strukturą, tj. stal austenityczną chromowo-niklową w gatunku X10CrNiTi 18-10 w stanie przesyconym oraz stal niskostopową o strukturze perlityczno-ferrytycznej 41Cr4. W celach porównawczych omawiany efekt Bauschingera wyznaczano dwoma metodami – metodą konwencjonalną oraz niekonwencjonalną metodą *small punch test*.

Używane w metodzie konwencjonalnej próbki miały kształt zbliżony do tych, które stosuje się dla statycznej próby rozciągania i poddawano je jednoosiowemu ścisnaniu i rozciąganiu. Jednak aby miały mniejszą podatność do wyboczenia w czasie procesu ścisnienia, przyjęto, że iloraz długości części pomiarowej próbki do jej średnicy będzie nie mniejszy niż 2,5.

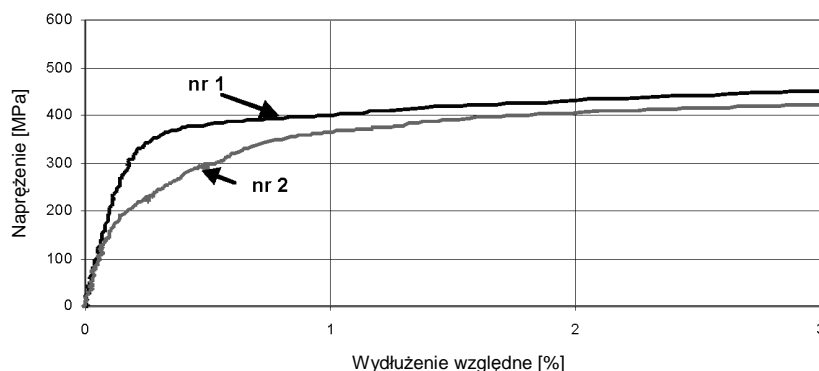


Rys. 1. Kolejne etapy próby SPT pozwalające ujawnić efekt Bauschingera
Fig. 1. Three stages illustrated minidisk deformation to disclose Bauschinger effect

W niekonwencjonalnej metodzie SPT jako próbki do badań stosuje się minikrażki. Do wyznaczenia efektu Bauschingera wykorzystano próbki o średnicy 6,35 mm i grubości 0,5 mm. Badania prowadzono w trzech etapach, każdorazowo na dwóch minikrażkach. Podczas etapu 1. pierwszą próbkę umieszczono w matrycy. Do jej powierzchni przylega ceramiczna kulka, wciskana podczas testów w płaską powierzchnię minikrażka aż do jego zniszczenia. W czasie próby rejestruje się przemieszczenie centralnej części dna minikrażka oraz siłę działającą na kulkę. Zadawanie naprężeń o przeciwnych znakach odbywało się w 2. i 3. etapie. W etapie 2. próbka zostaje nieznacznie wybrzuszona do momentu odpowiadającego założonej niewielkiej wartości siły, a następnie odciążona. W etapie 3. próbka jest odwracana i poddawana ponownemu wybrzuszaniu aż do jej pęknięcia. Proces ten zilustrowano na rys. 1.

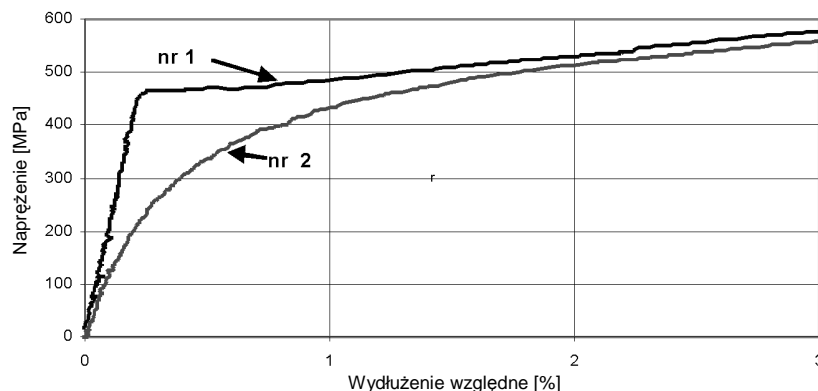
3. Zastosowanie statystycznej próby ściskania i rozciągania do ujawnienia efektu Bauschingera

Efekt Bauschingera dla metody konwencjonalnej uzyskano przez jednoosiowe ściskanie i rozciąganie próbek. Badania przeprowadzono na dwóch próbkach. Pierwszą rozciągnano – krzywa nr 1, drugą najpierw poddano ściskaniu o ok. 1,5%, a następnie rozciągnano – krzywa nr 2 (rys. 2). Ściskanie w niższym zakresie wartości odkształceń nie ujawniało tak wyraźnie wspomnianego efektu. W próbkach najpierw ściskanych, a następnie rozciąganych stwierdzono wyraźny spadek granicy plastyczności przy zachowaniu tej samej wytrzymałości na rozciąganie. Poniżej na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wykresy ze statycznej próby rozciągania dla początkowego zakresu odkształceń plastycznych dla obu materiałów.



Rys. 2. Początkowy zakres krzywych rozciągania dla stali X10CrNiTi 18-10, próbka rozciągana (nr 1) oraz ściskana i rozciągana (nr 2)

Fig. 2. Initial range of tensile strength curves for specimens tensioned (no. 1) and compressed and tensioned (no. 2), steel X10CrNiTi 18-10



Rys. 3. Początkowy zakres krzywych rozciągania dla stali 41Cr4, próbka rozciągana (nr 1) oraz ściskana i rozciągana (nr 2)

Fig. 3. Initial range of tensile strength curves for specimens tensioned (no. 1) and compressed and tensioned (no. 2), steel 41Cr4

Badania wykonano na 5 próbkach z każdego materiału. Wszystkie wykazywały istnienie wspomnianego efektu. Różnice średnich wartości granicy plastyczności próbek rozciąganych oraz tych, które poddano ściskaniu o 1,5%, a następnie rozciągano, wynosiły dla stali perlityczno-ferrytycznej $180 \text{ MPa} \pm 27 \text{ MPa}$, a dla stali austenitycznej $119 \text{ MPa} \pm 12 \text{ MPa}$ (błąd graniczny pomiaru wartości średniej dla $\alpha = 0,05$).

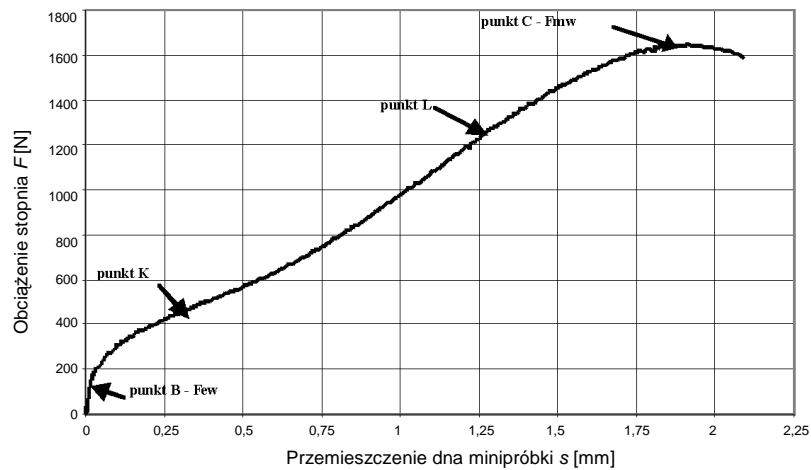
4. Zastosowanie próby SPT do ujawnienia efektu Bauschingera

Przebieg krzywej SPT – podobnie jak krzywej ze statycznej próby rozciągania – oddaje stan materiału. Na krzywej SPT można wyróżnić kilka charakterystycznych odcinków i punktów [1, 2].

Każda z krzywych rozpoczyna się od początkowego, stosunkowo krótkiego odcinka OB, nachylnego do osi przemieszczeń. W pierwszym stadium odkształcenia się próbki cechuje go proporcjonalna zależność siły od przemieszczenia. Z pewnym przybliżeniem przyjmuje się, że odpowiada on fazie odkształceń sprężystych w materiale próbki.

W punkcie B, odpowiadającym wartości siły F_{ew} , krzywa odchyła się od prostoliniowego przebiegu. Następnie szybkość narastania siły zmniejsza się, by po przekroczeniu pierwszego punktu przegięcia K narastać parabolicznie do drugiego punktu przegięcia L, w formie łuku KL zwanego niekiedy „siodełkiem”. W pobliżu punktu C opisana zależność narasta coraz wolniej wskutek słabszego wzrostu wartości obciążenia. Jednak w dalszym ciągu siła jest coraz większa. Po osiągnięciu siły maksymalnej F_{mw} następuje zniszczenie próbki.

O skłonności materiału do odkształceń plastycznych świadczą m.in. wyraźnie zaznaczona obecność i wielkość łuku KL. W materiałach w stanie umocnionym praktycznie łuk zanika i przechodzi w odcinek prostoliniowy lub zmienia swoją wypukłość.



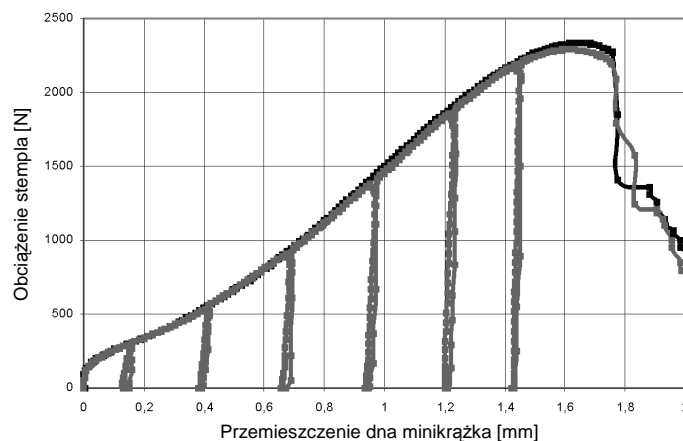
Rys. 4. Charakterystyczny wykres zależności obciążenie–przesunięcie dla próby kulkowej wybrzuszącej (metoda SPT)

Fig. 4. Typical load – deflection curve, for small punch test

4.1. Obciążenia jednoimienne

Badanie polegało na obciążaniu i odciążaniu krążków w czasie próby SPT. Tak uzyskany wykres porównywano z wykresem jednostajnie obciążanej próbki aż do jej perforacji. Poniżej zamieszczono wyniki dla stali typu 18-9.

Próbkę odciążano sześciokrotnie (rys. 5). Na podstawie przeprowadzonych badań nie stwierdzono znaczących różnic pomiędzy wykresami uzyskanymi w sposób ciągły a wykresami powstałymi przez kolejne obciążanie i odciążanie minikrążków.



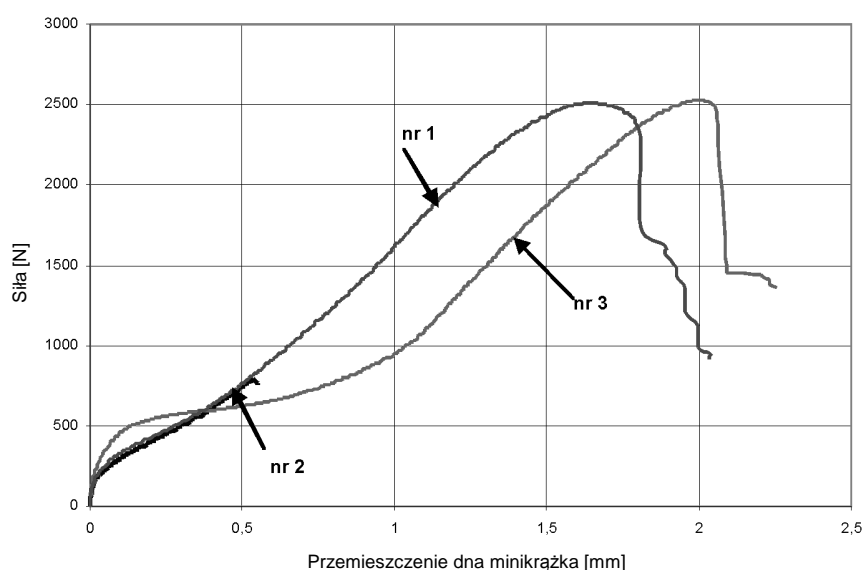
Rys. 5. Obciążanie i odciążanie minikrążka

Fig. 5. Loaded and unloaded mini disk

Podobne zjawisko obserwuje się dla próbek obciążanych i odciążanych podczas statycznej próby rozciągania.

4.2. Obciążenia przeciwnego znaku

Do badań efektu Bauschingera wybierano losowo dwa krążki. Jeden z krążków poddano próbie SPT do jego perforacji (krzywa nr 1). Na drugi początkowo wywarto nacisk kulką ceramiczną siłą 750 N (krzywa nr 2), następnie odciążono, obrócono krążek i ponownie poddano działaniu siły aż do pęknięcia minikrążka (krzywa nr 3). Zarejestrowane krzywe przedstawiono na rys. 6.

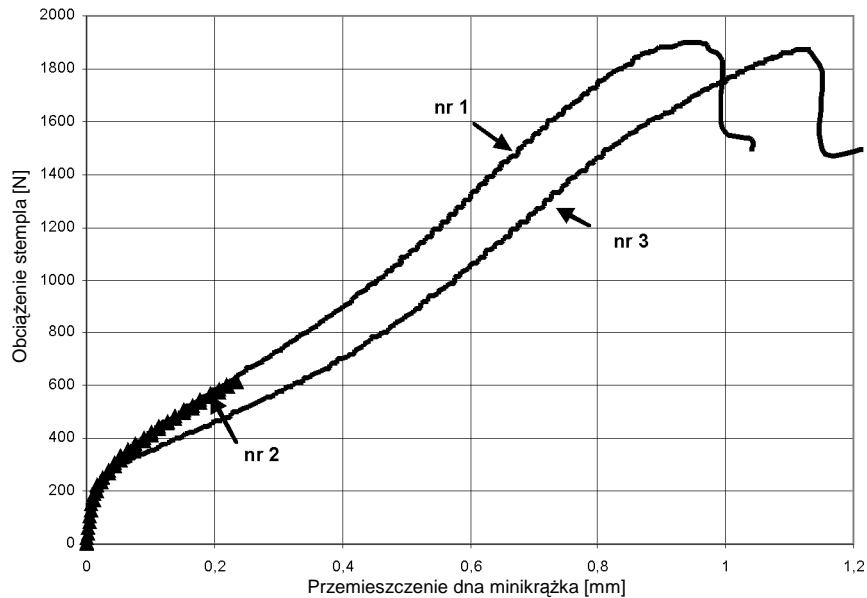


Rys. 6. Obciążenie – przemieszczenie z próby SPT dla stali X10CrNiTi, krzywa nr 1 – próbka nr 1 obciążona aż do zniszczenia, krzywa nr 2 – próbka nr 2 obciążona wstępnie, krzywa nr 3 – próbka nr 2 odwrócona i poddana obciążeniu aż do zniszczenia

Fig. 6. SPT method load – deflection curve for X10CrNiTi steel, curve nr 1 – load vs deflection curve for specimen nr 1, curve nr 2 – specimen nr 2 loaded up to 750 N, curve nr 3 – specimen nr 2 reversed load deflection curve

Porównując krzywe nr 1 i 3, można zauważyć, że zmiana obciążenia próbki w funkcji przemieszczenia dna minikrążka ma odmienny charakter. Na krzywej nr 3 pomiędzy wartościami przemieszczenia od ok. 0,25 mm do 1,25 mm siła narasta mniej stromo niż w wypadku próbki poddanej tylko jednokierunkowemu obciążeniu (krzywa nr 1). Na krzywej wyraźnie zaznacza się charakterystyczny łuk, tzw. siodełko, pomiędzy pierwszym i drugim punktem przegięcia, świadczący o większej skłonności analizowanego materiału do odkształceń plastycznych w porównaniu z próbką, w odniesieniu do której stosowano jednokierunkowe odkształcenie plastyczne [2]. Dodatkowo dla wartości przemieszczenia powyżej ok. 0,4 mm, dla tej samej wartości siły, obserwuje się wyższe wartości przemieszczenia dna minikrążka.

Podobne zjawisko można zauważyć dla stali 41Cr4 (rys. 7).



Rys. 7. Obciążenie – przemieszczenie z próby SPT dla stali 41Cr4
 Fig. 7. SPT method, load – deflection curve for steel 41Cr4

5. Podsumowanie

Dla próbek, których zwrot obciążenia jest przeciwny niż podczas niewielkiego pierwotnego odkształcenia, zaobserwowano inny przebieg krzywych SPT w porównaniu do próbek poddanych tylko jednostajnemu obciążeniu aż do zniszczenia. Na tych krzywych wyraźnie ujawnia się łuk KL pomiędzy pierwszym i drugim punktem przegięcia. Jest to charakterystyczne zjawisko dla materiałów ulegających uplastycznieniu przy niskich wartościach naprężeń. Wartość siły maksymalnej dla obu próbek pozostaje na niezmiennym poziomie. Jednocześnie obserwuje się, że powyżej pierwszego punktu przegięcia dla tej samej wartości siły przemieszczenie dna minikrażka jest wyższe.

Przeprowadzone obserwacje można zinterpretować w ten sposób, że niekonwencjonalna próba *small punch test* może służyć do ujawniania zjawiska zachodzącego w materiałach metalowych, a opisywanego jako efekt Bauschingera.

Literatura

- [1] Dobes F., Ule B., Biciego V., Kłaput J. i in., *Miniaturized disk-bend creep test of heat-resistant steels at elevated temperatures*, Engineering Mechanics, Vol. 5, Czech Republic 1999.
- [2] Kłaput J., *Niekonwencjonalne sposoby badania właściwości mechanicznych materiałów metalowych*, Dozór Techniczny 1, 2002.