



# **Metody kalibracji stosowane do wyznaczania odkształcalności granicznej w przypadkach obciążeń stałych**

# PLAN PREZENTACJI

1. Odkształcalność materiałów
2. Metody kalibracji
  - próba rozciągania,
  - próba spęczania,
  - próba skręcania.
3. Kryteria oceny odkształcalności granicznej
4. Materiał użyty do badań
5. Stanowiska badawcze
6. Przebieg badań doświadczalnych
7. Wyniki badań doświadczalnych
8. Czynniki tarcia
6. Analiza numeryczna
7. Rezultaty analizy
8. Wnioski
9. Literatura



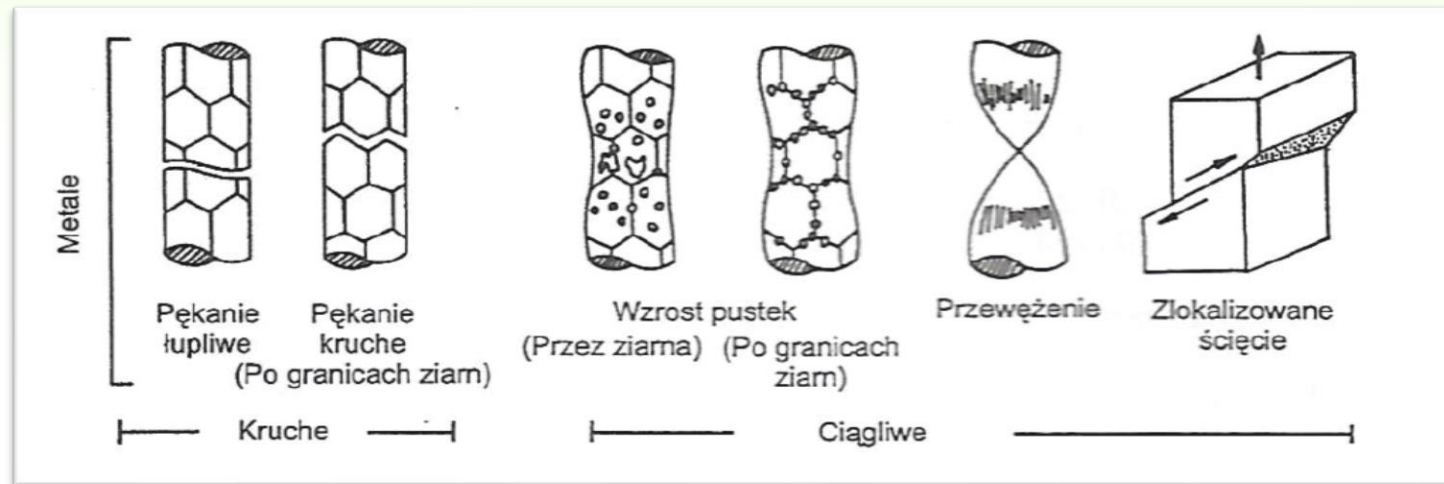
# ODKSZAŁCENIE MATERIAŁÓW



Podczas odkształcania materiału wyżarzonego pojawiają się, po okresie jednorodnego odkształcenia, obszary, w których odkształcenia uzyskują większe wartości od wartości średnich. Z powodu postępującego odkształcenia, rozprzestrzenianie odkształceń pogłębia się i prowadzi ostatecznie do zniszczenia materiału.

Metale i stopy pękają, gdy są poddane działaniu dostatecznie dużego obciążenia. Pękanie jest utratą spójności materiału poprzez rozdzielenie lub poślizg i uważa się, że jest to końcowe stadium procesu odkształcania materiałów.

Rysunek 1. Klasyfikacja morfologii pękania [1]



Uznano za właściwe opracowanie metod do przewidywania wystąpienia pęknięć jeszcze na etapie analizy teoretycznej projektowanego procesu. Znane warunki graniczne pozwalają oceniać ewentualne wystąpienie pęknięć. Precyzyjne określenie momentu i miejsca pęknięcia w przypadku materiałów o bardzo dobrej odkształcalności powoduje konieczność uwzględnienia różnego rodzaju modyfikacji testów pod kątem skomplikowania geometrii próbki lub/i kształtu narzędzi.



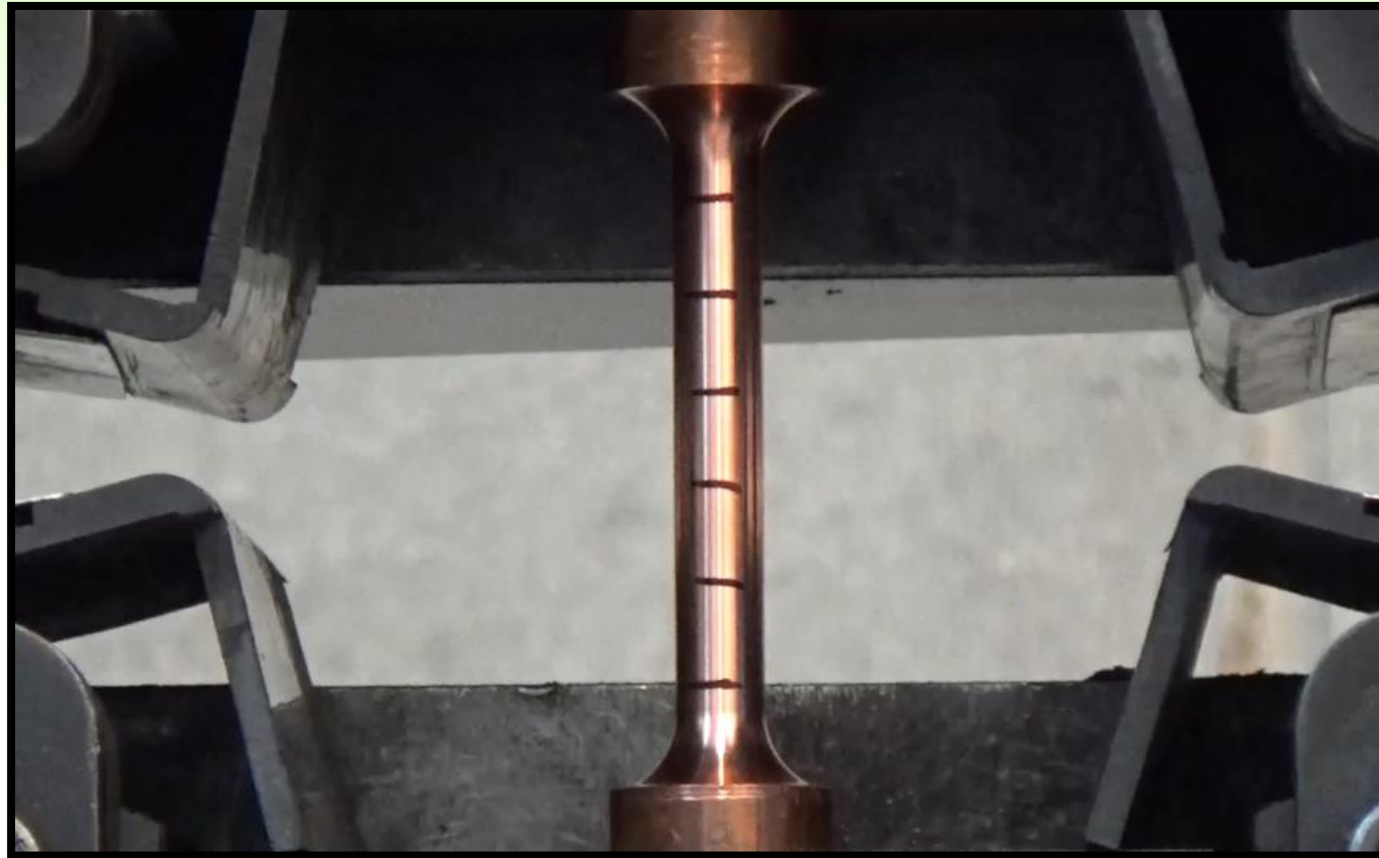
## Do głównych kwestii jakie należy wziąć pod uwagę przy wyborze metody zalicza się:

- Przeznaczenie wyników badań,
- Wartość maksymalnych odkształceń plastycznych,
- Zakres prędkości odkształceń możliwych do realizacji,
- Złożoność i pracochłonność przygotowania próbek,
- Możliwość zastosowania techniki komputerowej do kierowania badaniami i realizacji pomiarów,
- Możliwość modelowania różnych schematów obciążenia,
- Dostępność odpowiednich urządzeń badawczych.

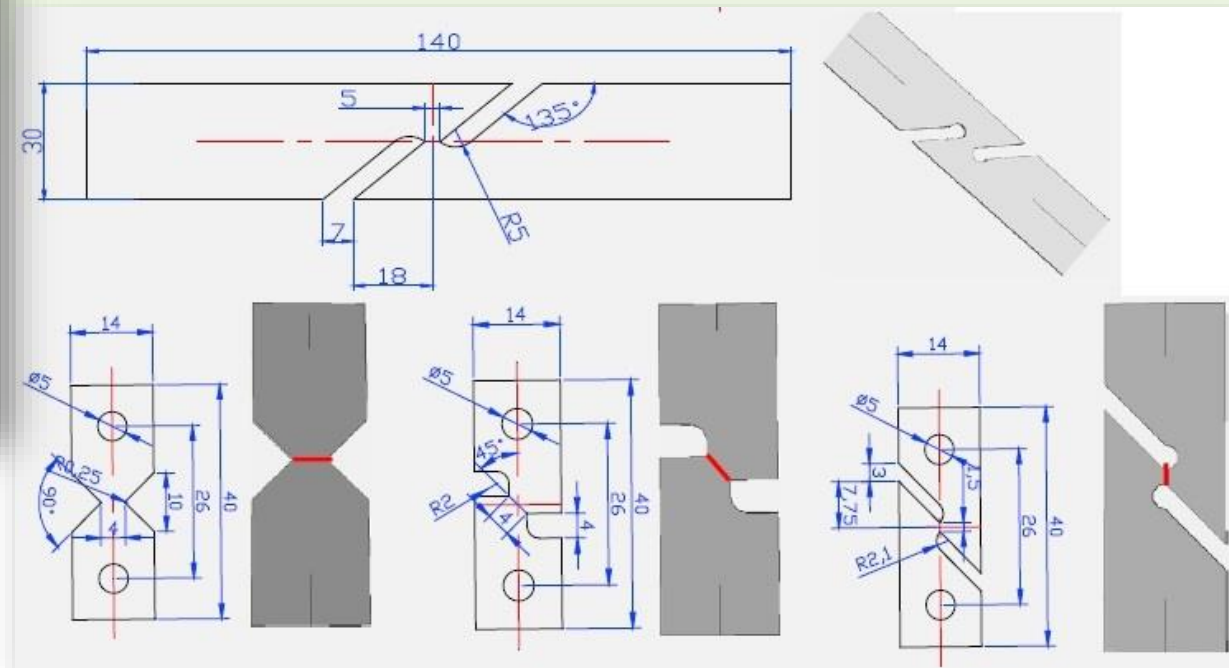
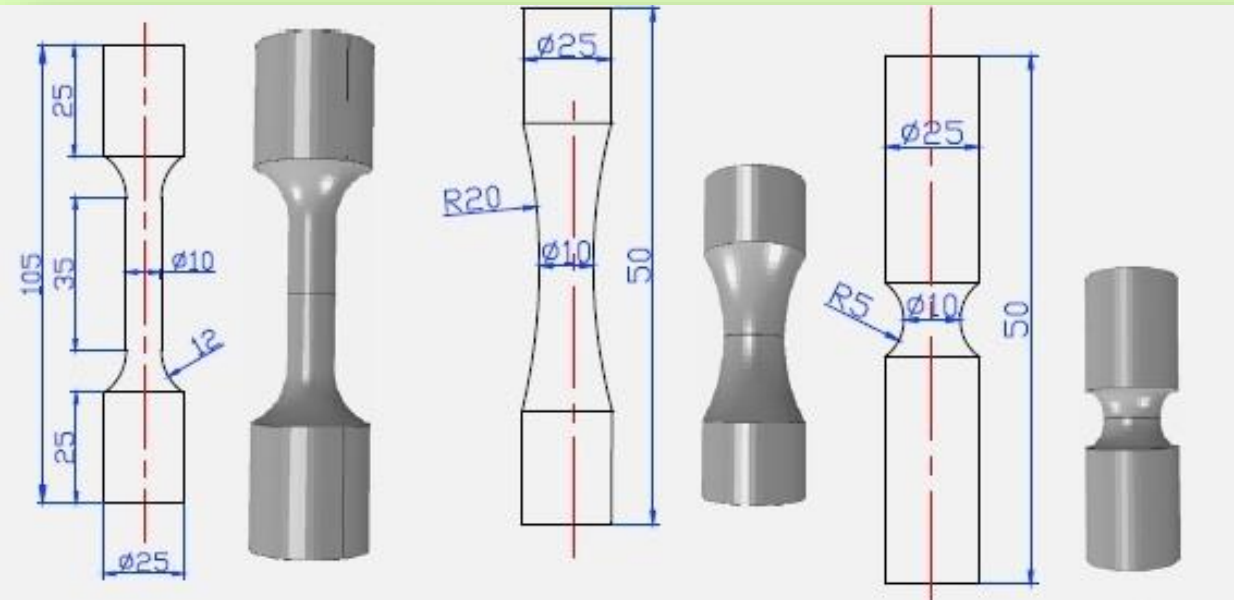


# METODY KALIBRACJI – próba rozciągania

**Próba rozciągania** – polega na jednoosiowym rozciąganiu bazując na odkształceniu próbki, najczęściej o poprzecznym przekroju kołowym. Charakteryzuje się prostotą i łatwością wykonania, jednak głównym ograniczeniem jest utrata stateczności próbki – pojawiające się przewężenie w części pomiarowej.



# METODY KALIBRACJI – próba rozciągania



Rysunek 2. Przykłady próbek (kształt i wymiary) stosowane do próby rozciągania [4]

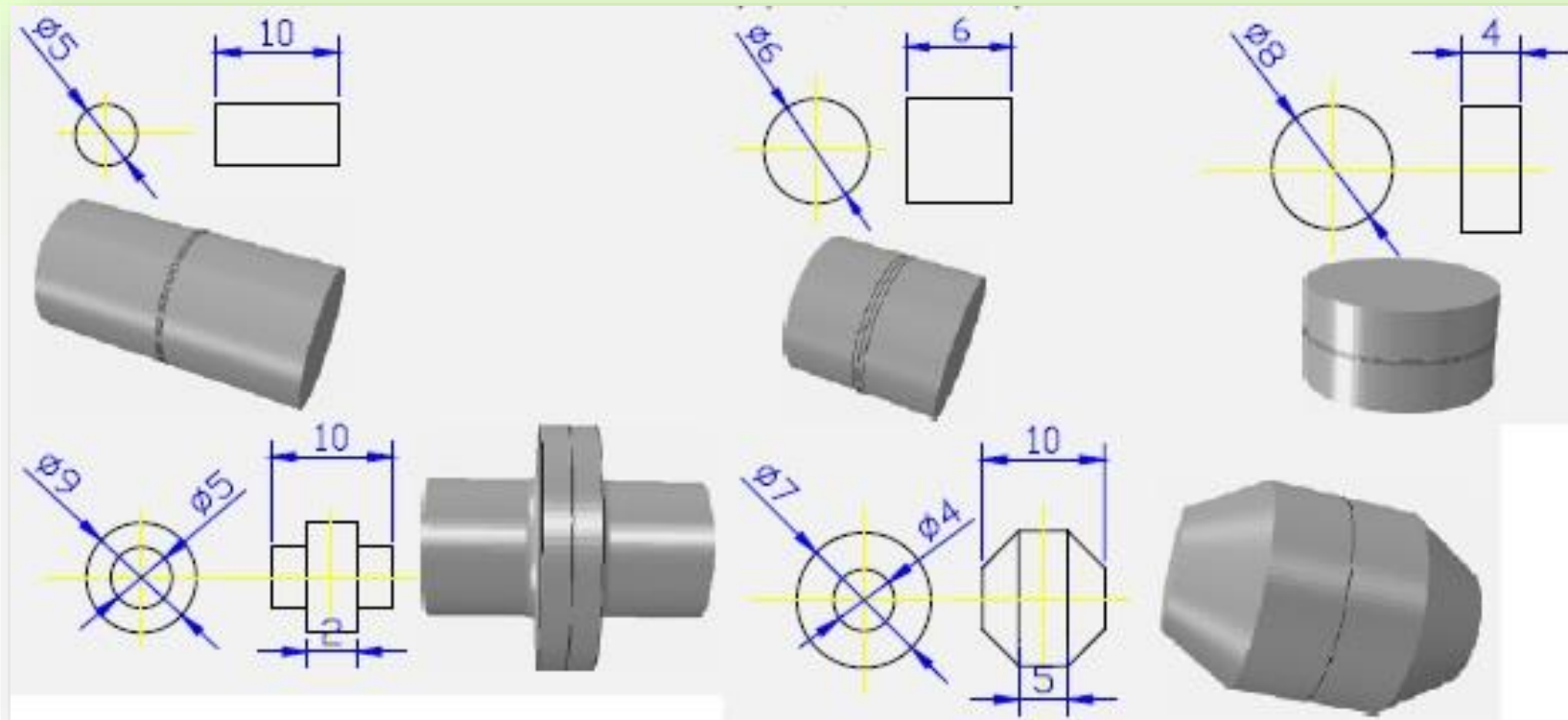


# METODY KALIBRACJI – próba spęczania

**Próba ściskania** – polega na jednoosiowym spęczaniu próbki płaskiej bądź cylindrycznej pomiędzy płaskimi kowadłami. Spęcznie cylindra należy do najprostszyc i najczęściej wykorzystywanych metod do oceny kryteriów zniszczenia.



# METODY KALIBRACJI – próba spęczania

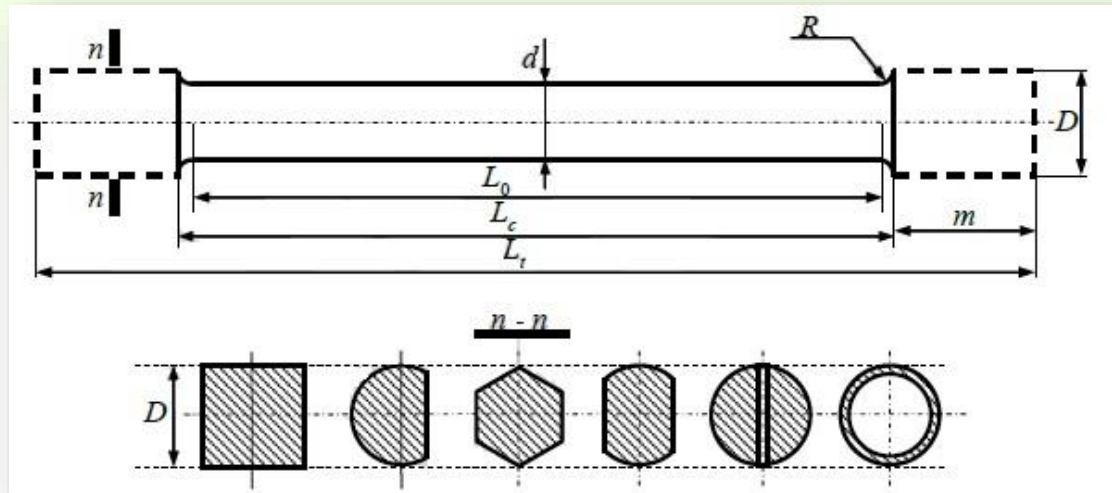


Rysunek 3. Przykłady próbek (kształt i wymiary) przeznaczonych do próby spęczania [4]



# METODY KALIBRACJI – próba skręcania

**Próba skręcania** – polega na odkształceniu plastycznym walcowej próbki pełnej bądź drażonej, w przypadku obciążenia parą sił o równych wartościach i przeciwnych zwrotach, działających w płaszczyźnie prostopadłej do osi pręta. Do próby skręcania stosuje się zazwyczaj próbki o stałym przekroju kołowym, próbki o innym przekroju stosowane są w szczególnych przypadkach.



Rysunek 4. Próbki stosowane do próby skręcania

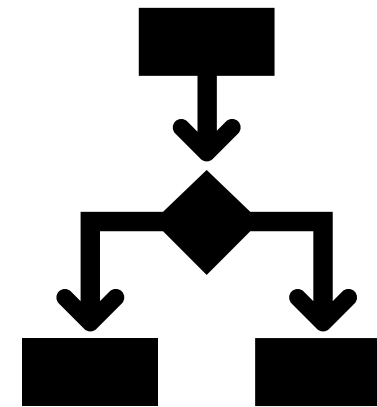
Wymiary próbek zwykle wynoszą:  
 $d = 10 \div 30$  mm,  
 $L_0 = (5 \div 20)d$ , najczęściej  $L_0 = 10d$

W przypadku cienkich prętów i drutów można je mocować bezpośrednio w odpowiednich uchwytach. Typowe próbki mają głowy o przekroju kołowym, kwadratowym,  $n$ -krotnym, mogą również posiadać nacięcia. Mimo kształtu muszą spełniać wymóg osiowego ustawienia próbki i uniemożliwić obrót głowy wewnątrz uchwytów.



## Do czynników, które wpływają na wyniki badań zalicza się:

- Typ sieci krystalicznej materiału, stan strukturalny, anizotropię własności,
- Oddziaływanie efektu cieplnego na skutek odkształcenia plastycznego i występowanie gradientu temperatury na długości i przekroju porzecznym próbki,
- Sposób mocowania próbki i warunki na powierzchni styku próbki z uchwytem,
- Wpływ dynamicznego obciążenia i sztywności układu „maszyna-próbka”,
- Powstawanie lokalizacji odkształcenia i rozkład prędkości odkształcenia na długości i przekroju próbki,
- Czynnik skali badań i ciśnienia hydrostatycznego.



# Kryteria fenomenologiczne do oceny odkształcalności granicznej

Gdzie:

- $\varepsilon_f(t)$  – wartość odkształcenia, przy której nastąpiło pęknięcie,
- $\bar{\sigma}$  – naprężenie zastępcze,
- $\varepsilon$  - odkształcenie rzeczywiste,
- $\sigma_{max}$  – naprężenie maksymalne,
- $\sigma_H$  – naprężenie średnie,
- A, B, C – stałe materiałowe,
- $\sigma_{min}$  – naprężenie minimalne.

Kryterium	Równanie
Freudenthal	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} \bar{\sigma} d\varepsilon \geq C$
Cockroft - Latham	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} \sigma_{max} d\varepsilon \geq C$
Znormalizowany Cockroft - Latham	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} \frac{\sigma_{max}}{\sigma_H} d\varepsilon \geq C$
Brozzo i inni	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} \frac{2\sigma_{max}}{3(\sigma_{max} - \sigma_H)} d\varepsilon \geq C$
Ayada	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}} d\varepsilon \geq C$
Oyane	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} \left(1 + \frac{1}{A} \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}}\right) d\varepsilon \geq C$
Zhan i inni	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} (\sigma_{max} - \sigma_H) d\varepsilon \geq C$
Rice & Tracey	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} \exp\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma_H}{\bar{\sigma}}\right) d\varepsilon \geq C$
Norris i inni	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} \frac{1}{(1 - c * \sigma_H)} d\varepsilon \geq C$
Gosh	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} d\varepsilon \geq C$
Datsko	$\int_0^{\varepsilon_f(t)} d\varepsilon \geq C$

Tabela 1. Wybrane funkcje zniszczenia stosowane w analizie pęknięcia ciągłego [5]



# Materiał do badań – brąz BA1032



Brąz BA1032 - brąz aluminiowo – żelazowo - manganowy (cechą charakterystyczną jest wysoka odporność na korozję i zmienne obciążenia udarowe, odporny na obciążenia statyczne, ścieranie; stosowany do produkcji silnie obciążonych części maszyn silników oraz osprzętu).



Pierwiastek	Brąz BA1032	
	Min [%]	Max [%]
Si	-	0,3
Fe	2,0	4,0
Mn	1,0	2,0
Zn	-	0,50
Al	9,0	11,0
Ni	-	0,5
Sn	-	0,20

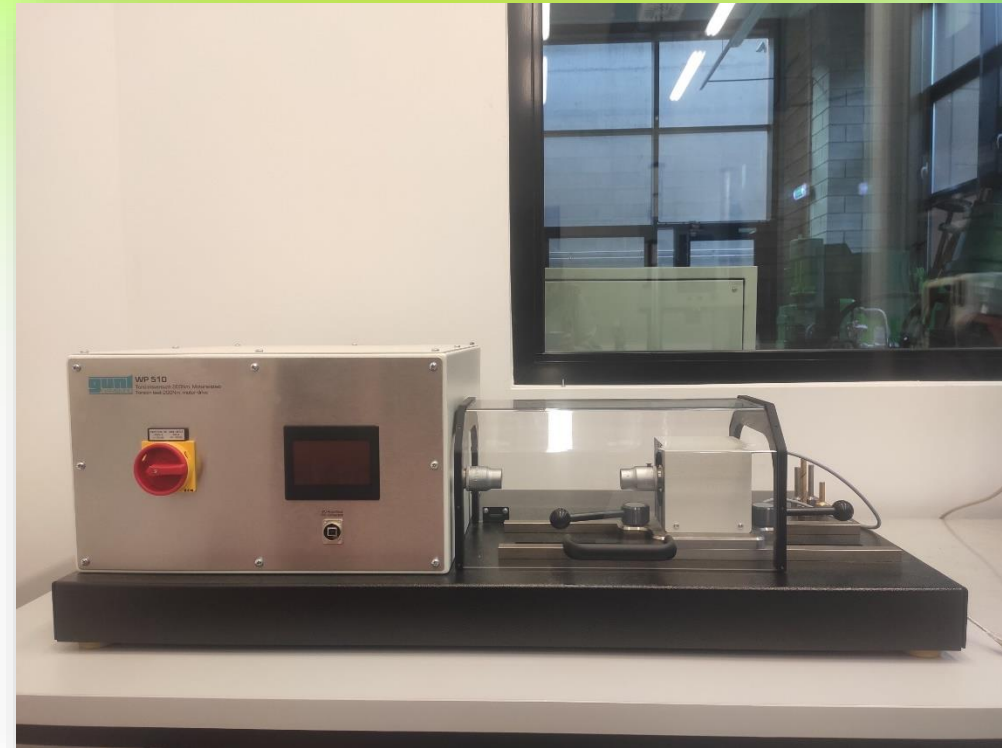
Tabela 2. Skład chemiczny materiału



# STANOWISKO BADAWCZE



Rysunek 5. Maszyna wytrzymałościowa INSTRON o nacisku maksymalnym do 1000 kN



Rysunek 6. Skrętarka WP 510 o maksymalnym momencie skręcającym 200 Nm

Maszyny są na wyposażeniu laboratorium Katedry Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechniki Lubelskiej.



# PRZEBIEG BADAŃ, parametry procesu

Badania doświadczalne realizowano według następującego schematu:

- Umieszczenie próbki w uchwytach maszyny bądź na kowadło dolnym (spęczanie),
- Kształtowanie próbki z rejestracją siły bądź momentu skręcającego,
- Wycofanie narzędzi do położenia początkowego,
- Wyjęcie elementu z przestrzeni roboczej maszyn.

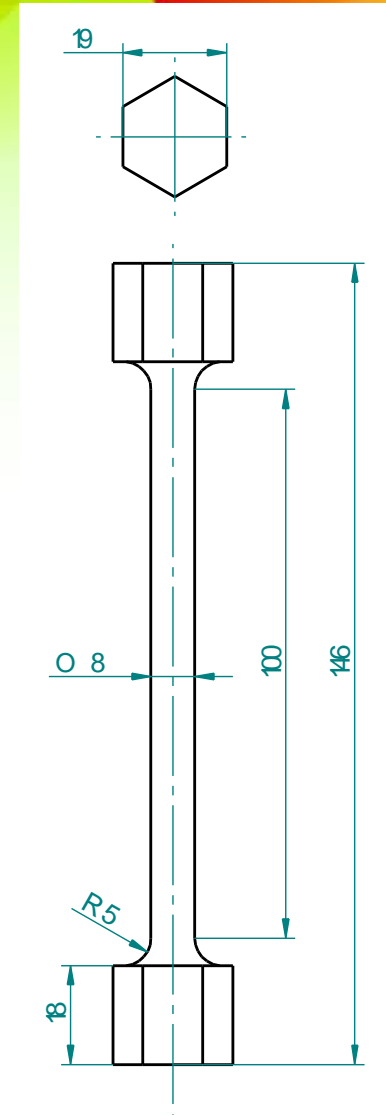
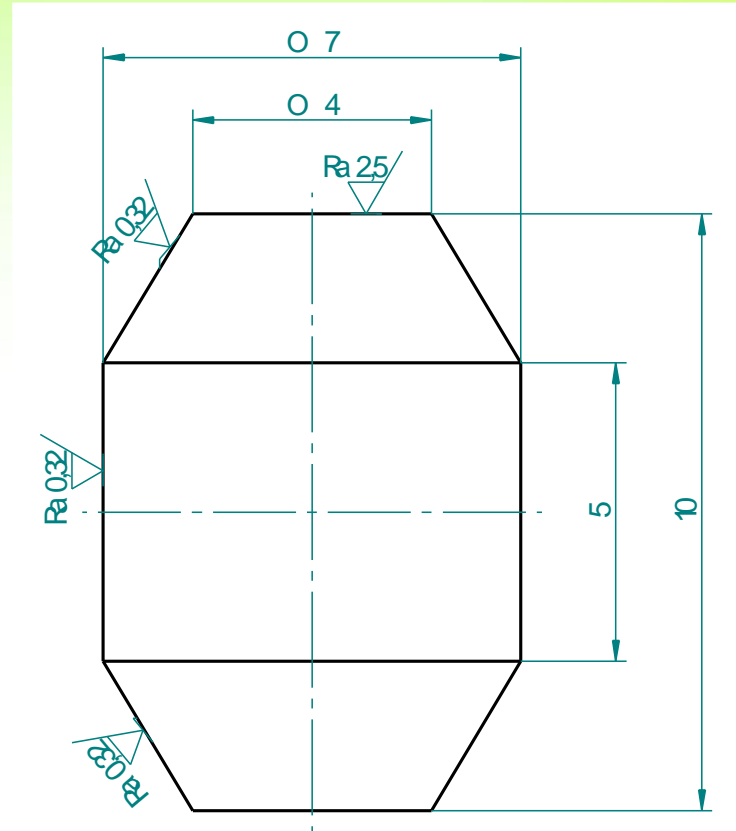
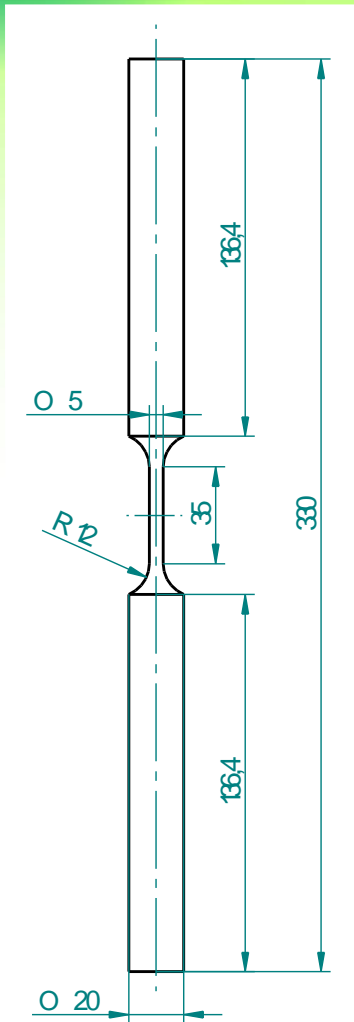
Do prób przydzielono po 3 próbki, stąd powyższy schemat realizowano z taką samą powtarzalnością dla pozostałych prób.

Parametr	Wartość
Temperatura próbek	20 °C
Prędkość kształtowania – rozciąganie i spęczanie	5 mm/min
Prędkość kształtowania – skręcanie	500 °/min

Tabela 3. Parametry procesu



# PRÓBKKI ZASTOSOWANE W BADANIACH DOŚWIADCZALNYCH – kształt i wymiary



Rysunek 7. Próbkki zastosowane w próbach rozciągania, ściskania, skręcania kolejno od lewej (kształt i wymiary)



# PRÓBKKI ZASTOSOWANE W BADANIACH DOŚWIADCZALNYCH – fotografie próbek



Rysunek 8. Próbkki zastosowane w próbach rozciągania, ścężania, skręcania (kolejno od lewej)





# WYNIKI PRÓB - fotografie próbek



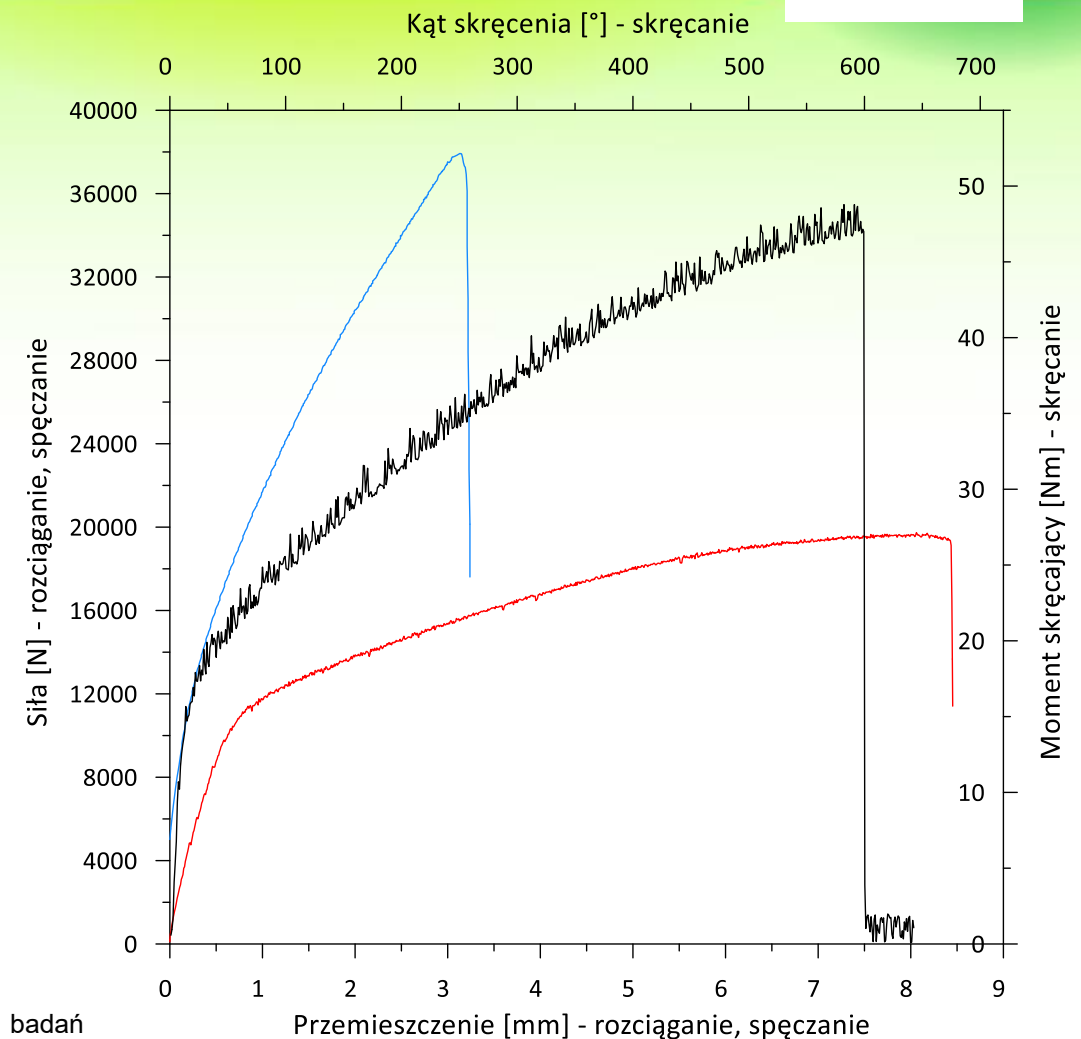
Rysunek 9. Widoki elementów po przeprowadzonej próbie rozciągania, spęczania i skręcania (kolejno od lewej)



# WYNIKI Z PRÓB DOŚWIADCZALNYCH – średnie wartości sił i momentu skręcającego

Podczas prób doświadczalnych rejestrowano wartość sił oraz momentu skręcającego. Rozkłady mają podobny przebieg. Pęknięcie wystąpiło przy wartości:

- W próbie rozciągania – 19 735 [N]
- W próbie spęczania – 37 924 [N]
- W próbie skręcania – 53,21 [Nm]



Rysunek 10. Zmiana wartości sił i momentu podczas przeprowadzonych badań



# CZYNNIKI TARCIA

Wartość czynnika tarcia wyznaczono wykorzystując metodę spęczania pierścieni, która polega na spęczaniu próbki między równoległymi płaskimi kowadłami. W tym celu wykorzystano maszynę wytrzymałościową INSTRON 1000HDX. Prędkość spęczania wynosiła 5 mm/min, do próby przydzielono 3 próbki.

W programie DEFORM 3D przeprowadzono symulację spęczania pierścieni dla wszystkich próbek z podanych materiałów, zmieniając wartości czynnika tarcia  $m$ , co miało na celu uzyskanie najlepszej zbieżności pomiędzy teoretycznymi i doświadczalnymi wymiarami próbek. Optymalne wartości współczynnika lub czynnika tarcia wyznaczono na podstawie najmniejszych wartości funkcji określającej odchylenie wartości teoretycznych od doświadczalnych, wyrażonej zależnością:

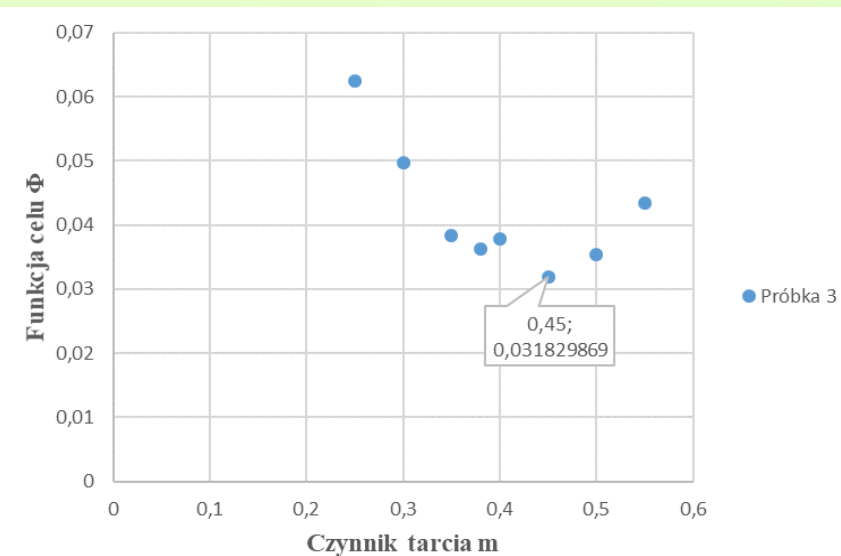
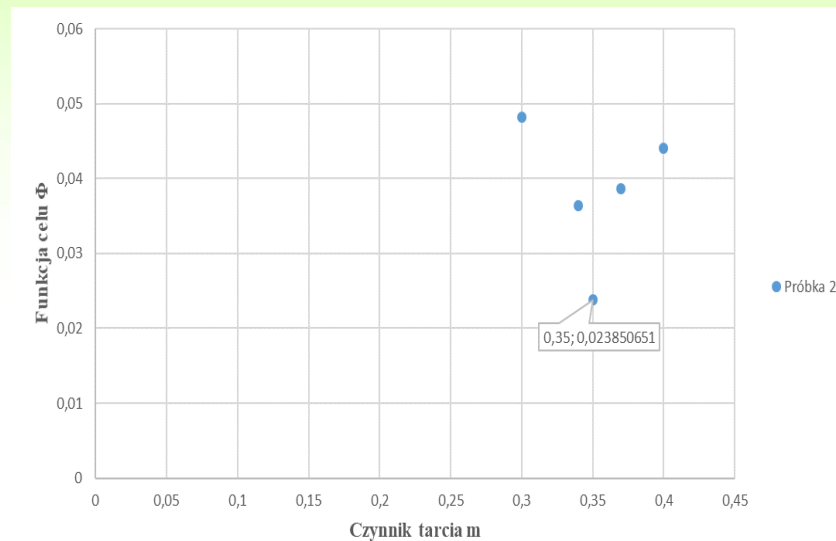
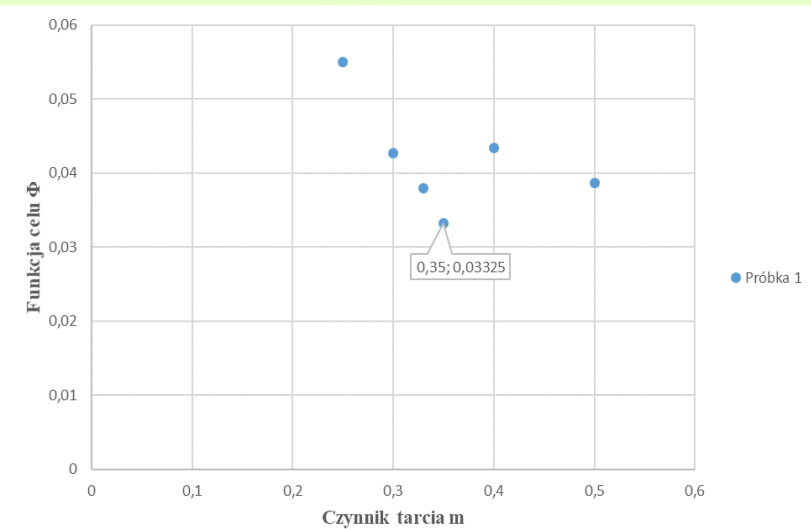
$$\Phi_d = \left| \frac{D_d - D_t}{D_d} \right| + \left| \frac{d_d - d_t}{d_t} \right|$$

gdzie:

$D_d$  – średnia średnica zewnętrzna próbki uzyskana w doświadczeniu,  $D_t$  – średnia średnica zewnętrzna próbki uzyskana w symulacji,  
 $d_d$  – średnia średnica wewnętrzna próbki uzyskana w doświadczeniu,  $d_t$  – średnia średnica wewnętrzna próbki uzyskana w symulacji.



# CZYNNIKI TARCIA – funkcja celu



Rysunek 11. Zależność funkcji celu  $\Phi$  od czynnika tarcia dla brązu BA1032 – próbka 1, 2, 3

Wartość średnia czynnika tarcia dla brązu BA1032 wyniosła  $m=0,38$ , zaś współczynnika tarcia  $\mu=0,19$ .



# ANALIZA NUMERYCZNA

Modele geometryczne prób rozciągania, ściskania i skręcania zostały stworzone przy użyciu programu DEFORM 3D. Ocena wartości zniszczenia została dokonana według znormalizowanego kryterium Cockrofta – Lathama, które jest najczęściej używane w programach do symulacji numerycznej. Model materiałowy został zaczerpnięty z biblioteki oprogramowania DEFORM 3D.

Rysunek 12. Modele geometryczne poszczególnych prób stworzone w programie DEFORM 3D, rozciąganie, spężanie i skręcanie, kolejno od lewej

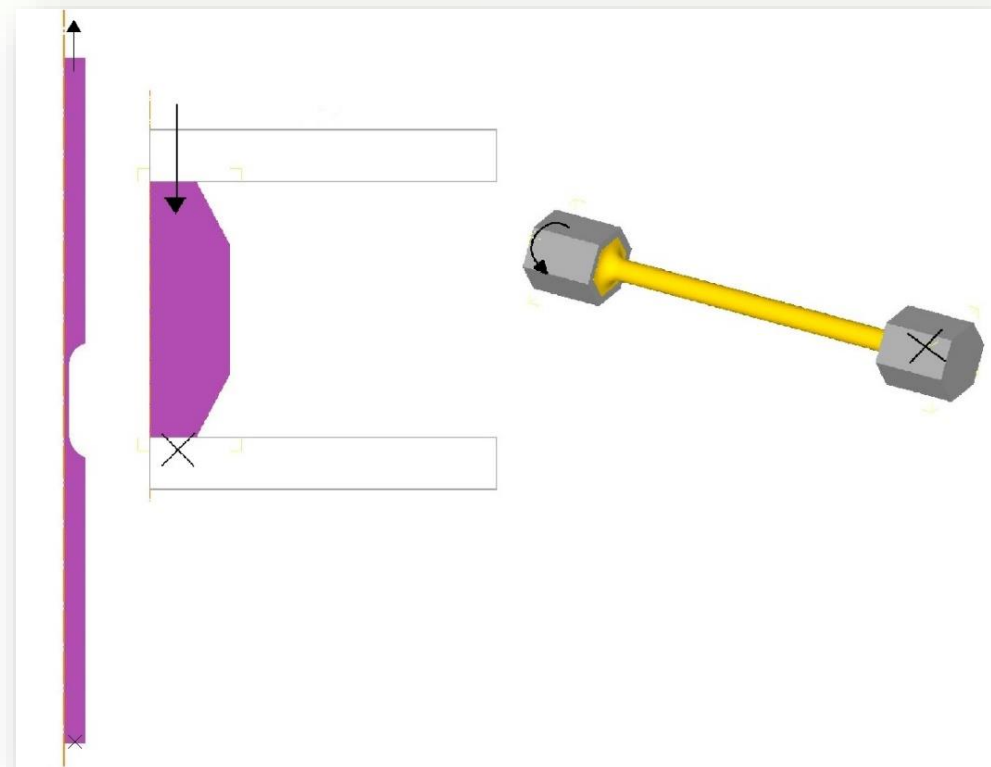
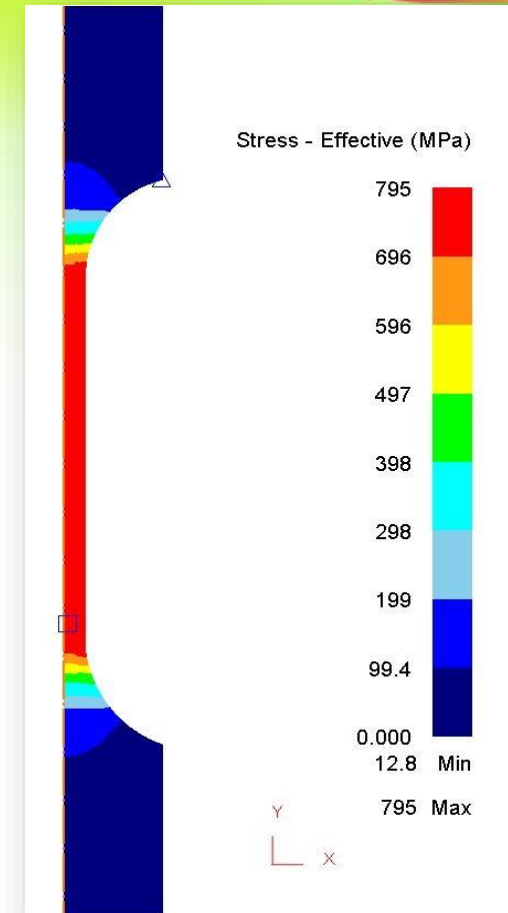
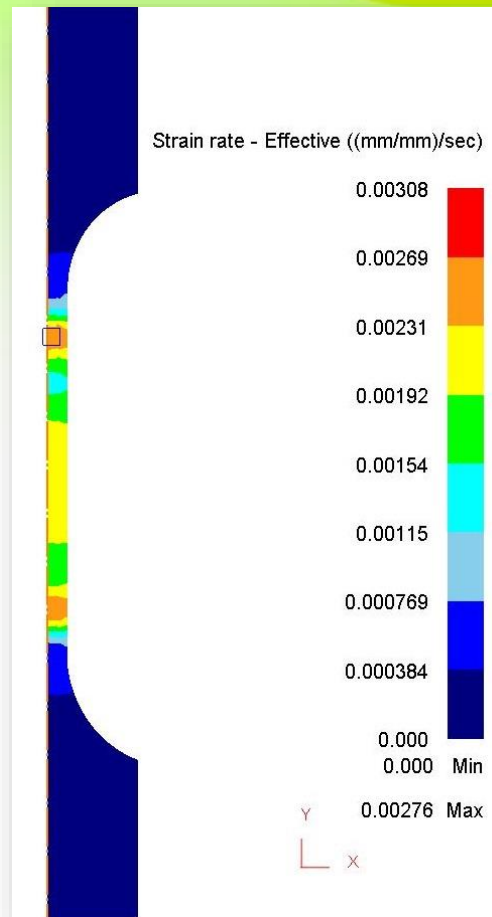
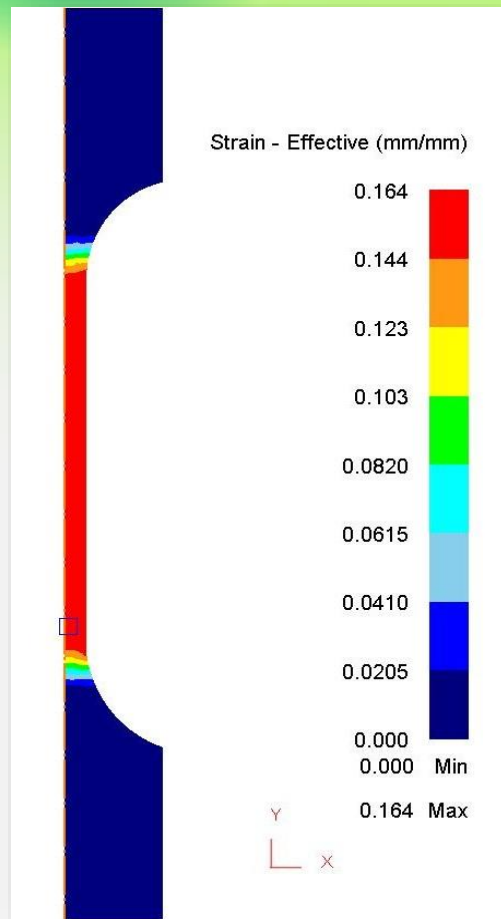


Tabela 4.  
Parametry analizy numerycznej

Nazwa	Parametr
Program MES	DEFORM 3D v11.1
Moduł obliczeń	Rozciąganie, spężanie – 2D Skręcanie – 3D
Model materiałowy próbki	Elastyczno – plastyczny
Model materiałowy narzędzi	Sztywny
Liczba elementów	Rozciąganie – 10208 Spężanie – 10292 Skręcanie – 75000
Liczba kroków	Rozciąganie – 400 Spężanie – 200 Skręcanie – 1000
Prędkość narzędzi	Rozciąganie, spężanie – 0,083 mm/s Skręcanie – 0,145 rad/s
Czynnik tarcia	0,38
Temperatura próbek	20 °C

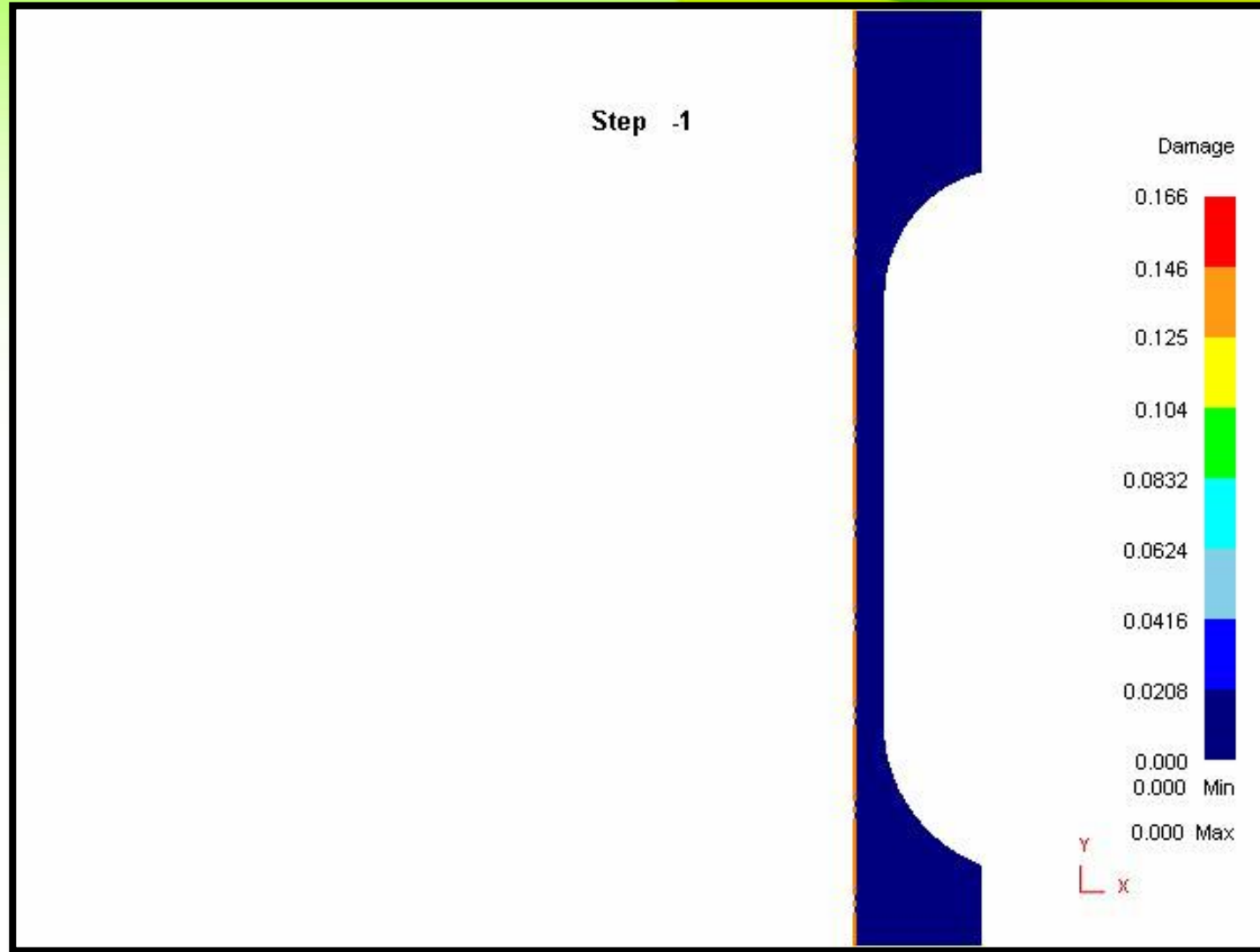
# PRÓBA ROZCIĄGANIA – wyniki z analizy numerycznej



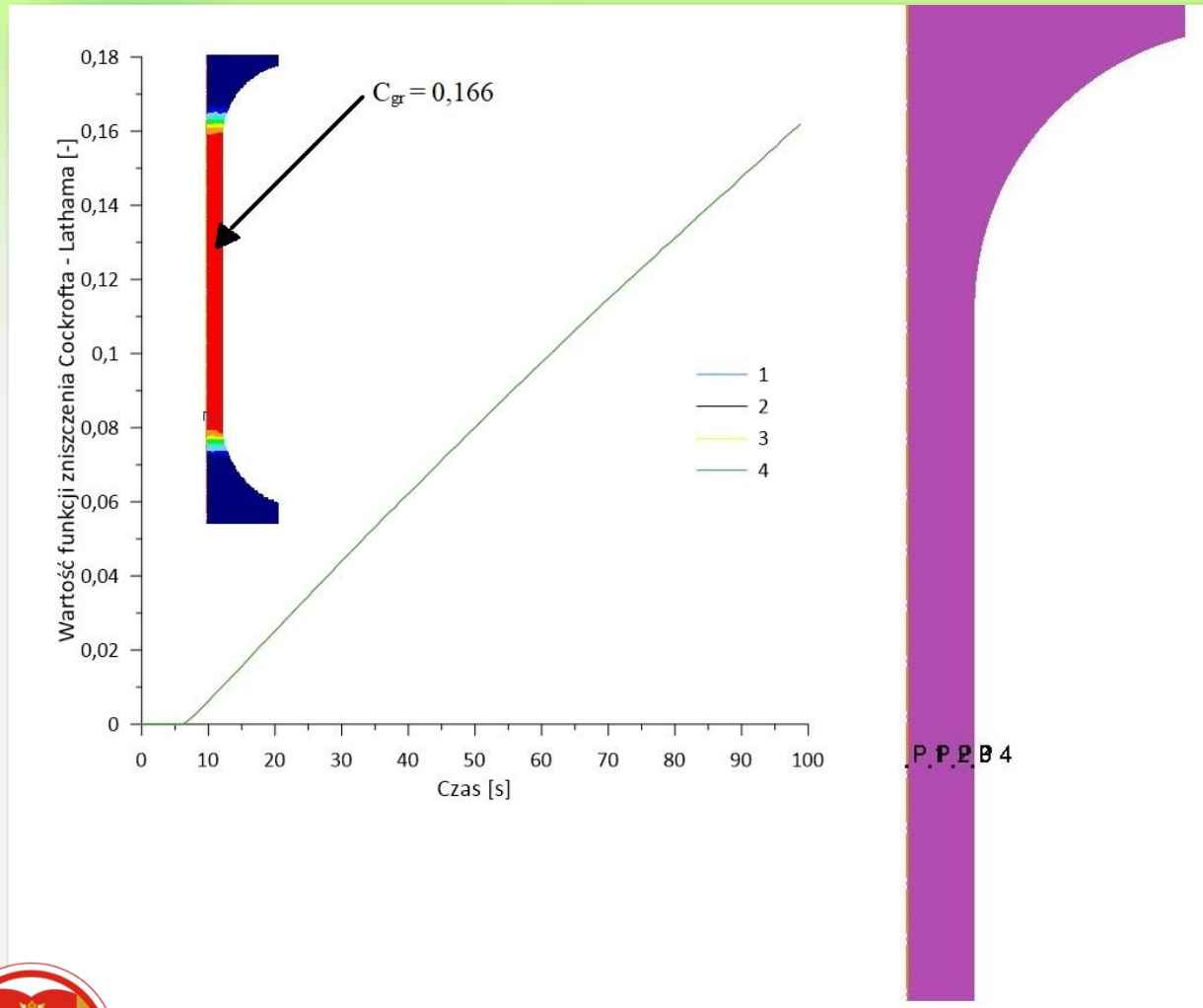
Rysunek 13. Rozkład wartości średnich odkształcenia, szybkości odkształcenia i naprężenia (kolejno od lewej) w próbce z brązu BA1032, prędkość rozciągania 5 mm/min



# PRÓBA ROZCIĄGANIA – wyniki z analizy numerycznej



# PRÓBA ROZCIĄGANIA – wyniki z analizy numerycznej



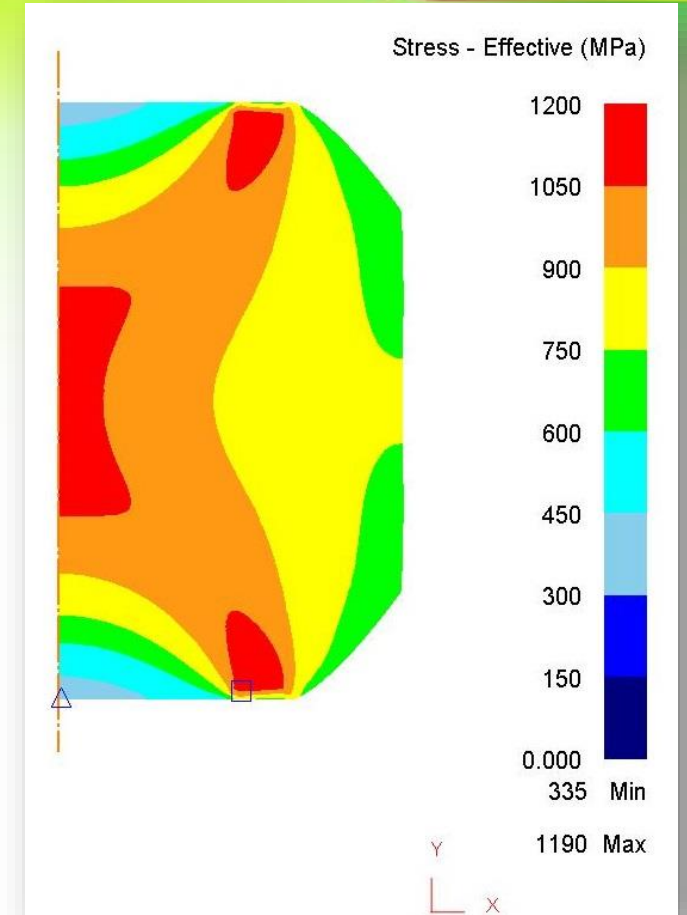
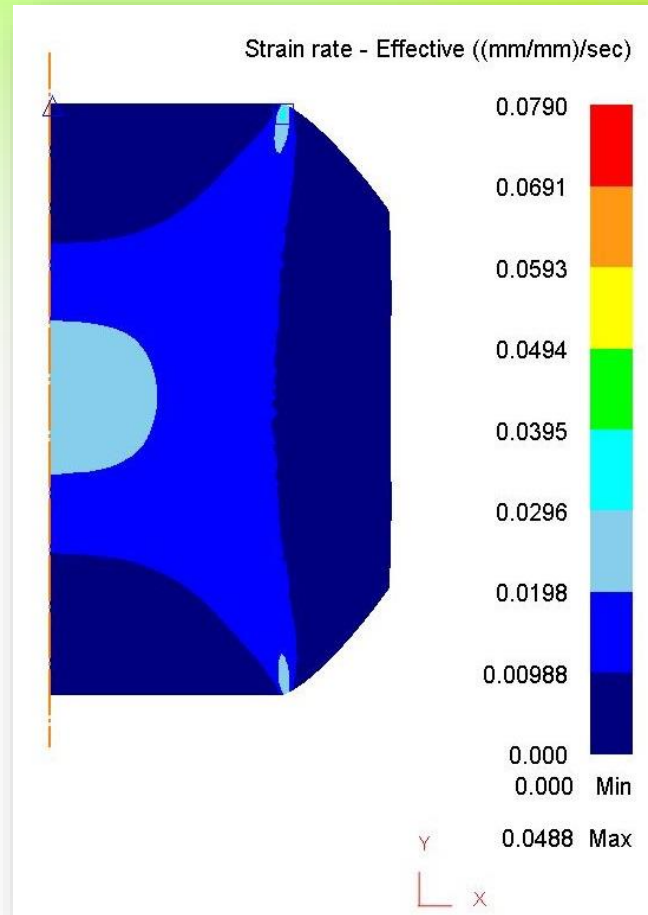
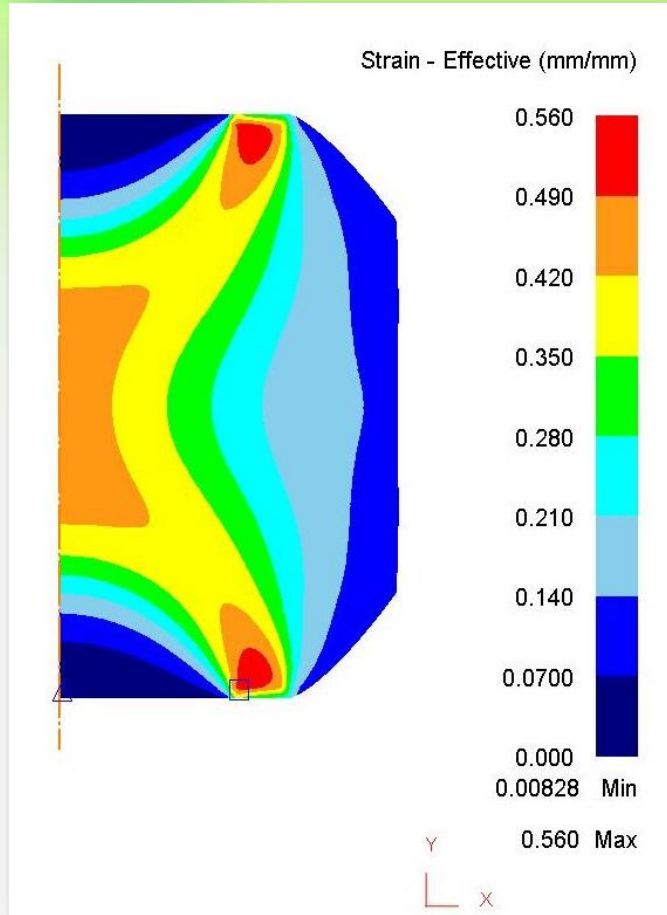
Największe wartości całka Cockrofta – Lathama przyjmuje w przewężeniu, tam też dochodziło do naruszenia spójności materiału. Wartość całki w tym miejscu w fazie rozciągania przyjmowano jako wartość graniczną. W osi próbki w części przewężonej umieszczono 4 sensory, rozmieszczone co 0,625 mm. Sensor nr 1 leżał w centrum próbki, zaś nr 4 na powierzchni bocznej. Za największą wartość przyjęto 0,166.

Rysunek 14. Zmiana wartości funkcji zniszczenia w próbce poddanej próbie rozciągania, obliczonej zgodnie z kryterium Cockrofta – Lathama, w osi obciskanej próbki





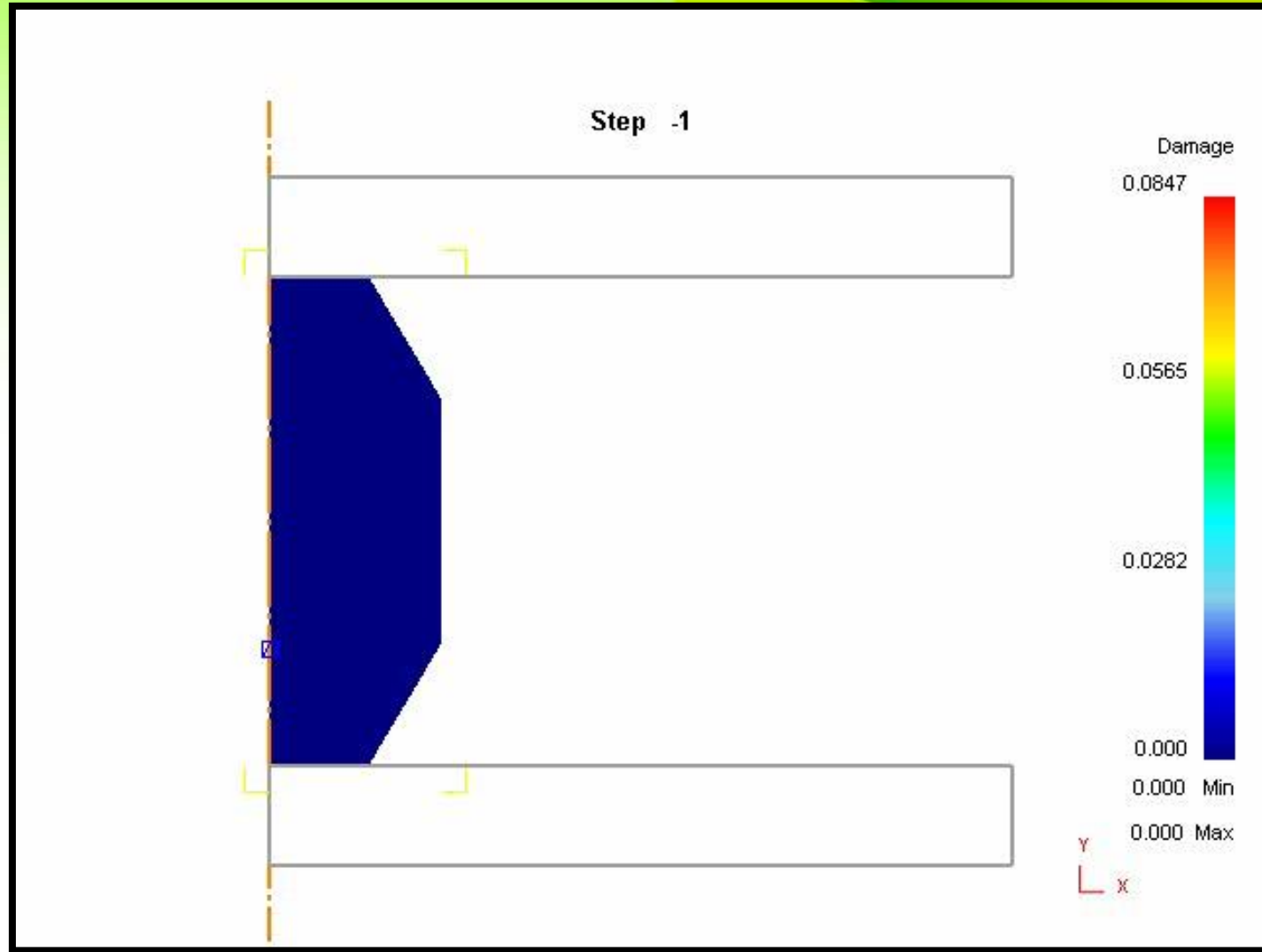
# PRÓBA SPĘCZANIA – wyniki z analizy numerycznej



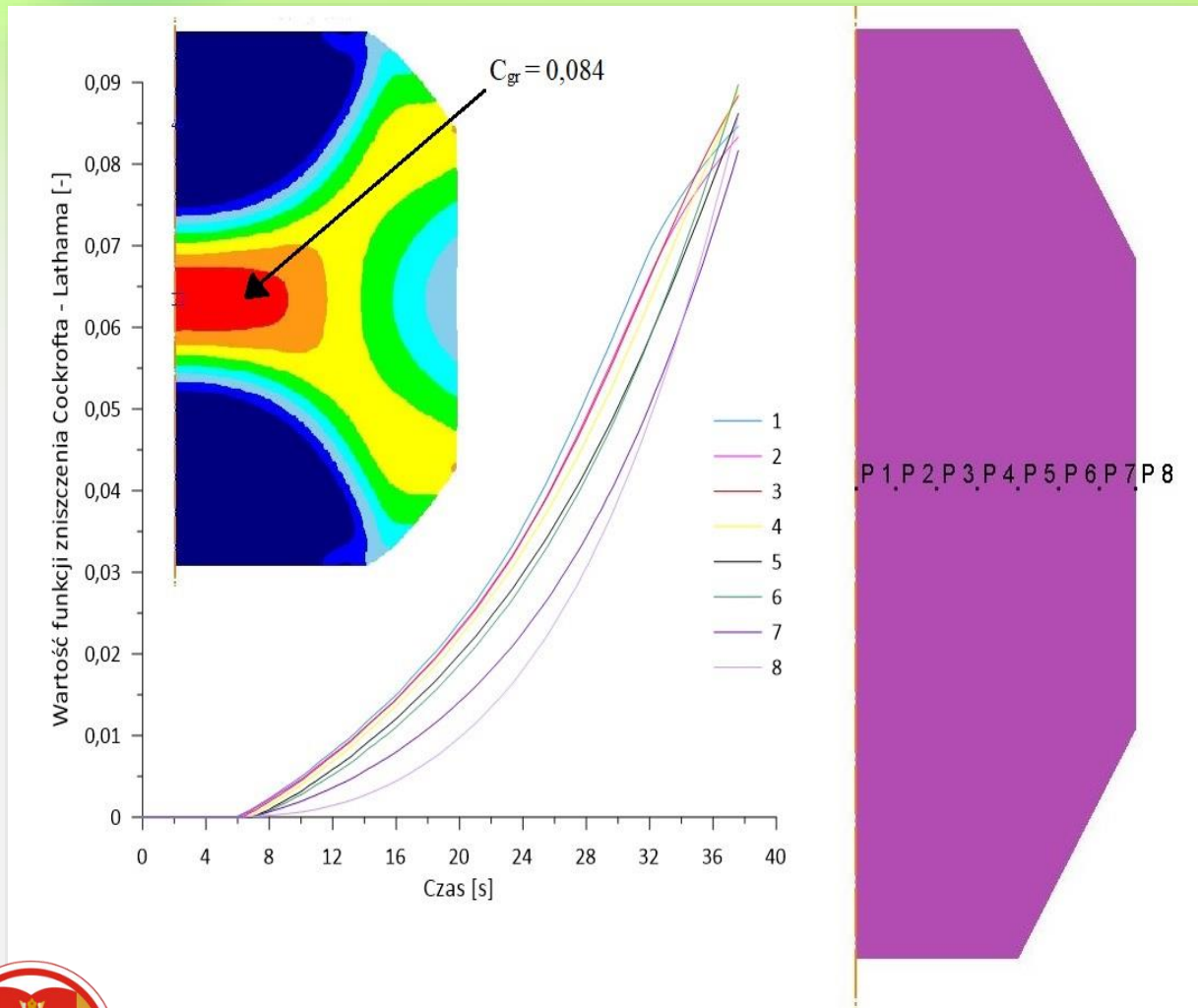
Rysunek 15. Rozkład wartości średnich odkształcenia, szybkości odkształcenia i naprężenia (kolejno od lewej) w próbce z brązu BA1032, prędkość spęczania 5 mm/min



# PRÓBA SPEŁCZANIA – wyniki z analizy numerycznej



# PRÓBA SPĘCZANIA – wyniki z analizy numerycznej

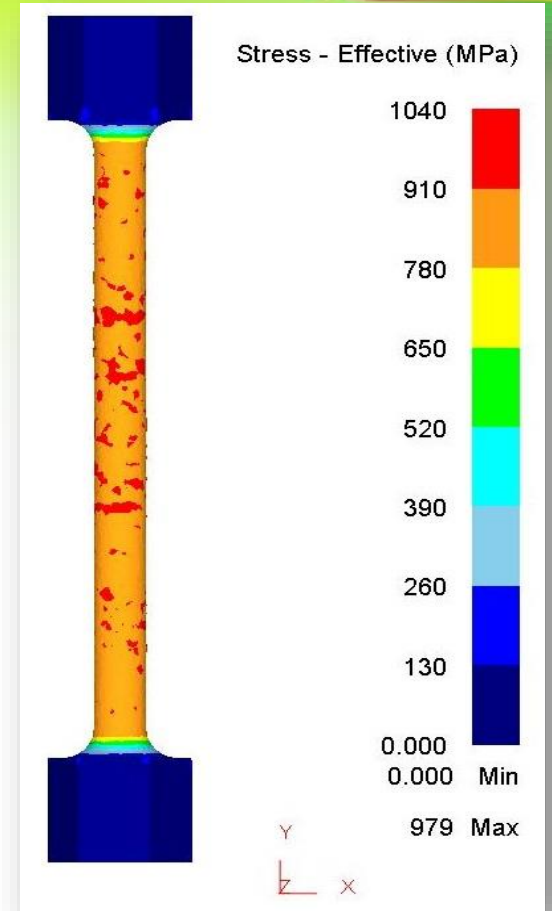
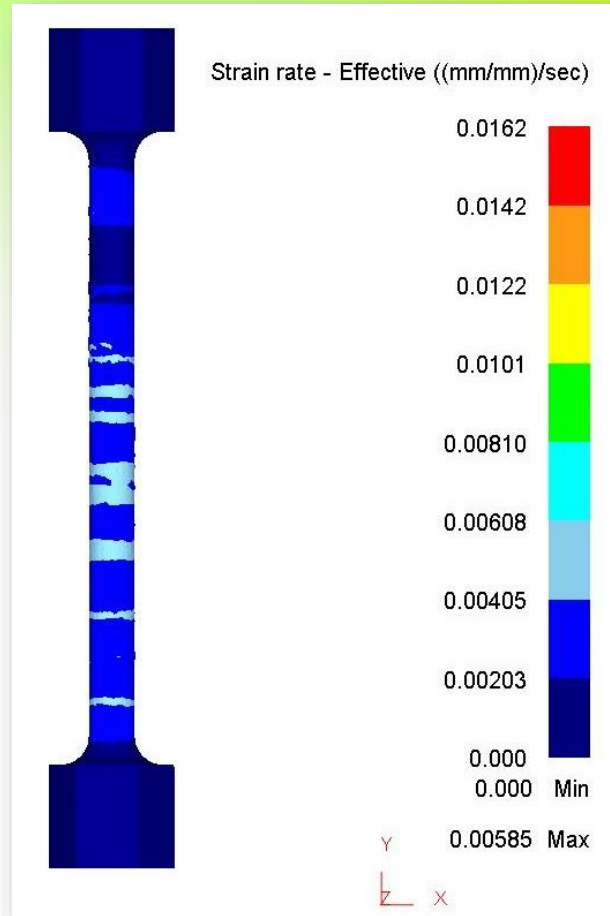
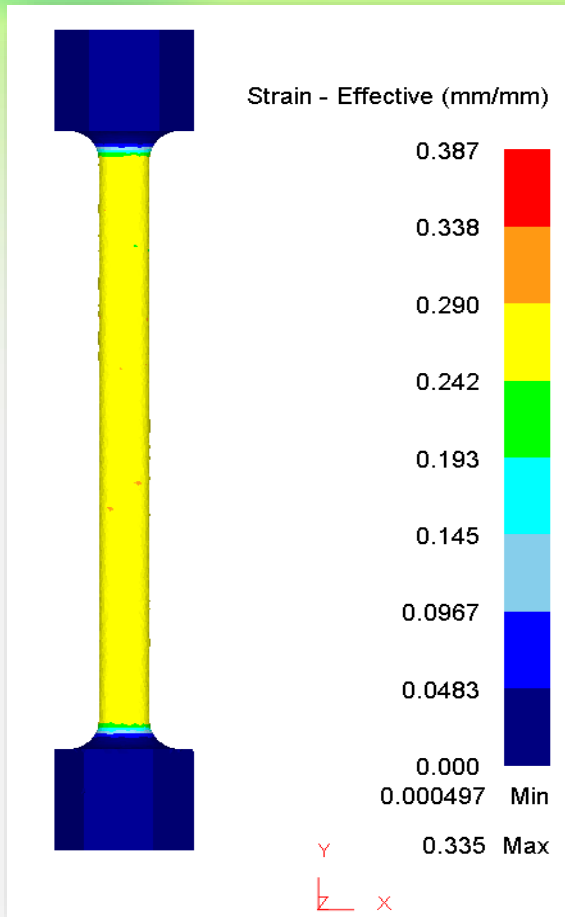


W elemencie poddanym próbie spęczenia doszło do pęknięcia nachylonego do osi pod kątem około  $45^\circ$ . W osi próbki umieszczono 8 sensorów, co 0,5 mm. Sensor nr 1 leżał w centrum próbki, zaś nr 8 na powierzchni bocznej. Maksymalna wartość funkcji zniszczenia wystąpiła w punkcie 1 (w centrum próbki). Wartość funkcji zniszczenia z danej próby określono na 0,084.

Rysunek 16. Zmiana wartości funkcji zniszczenia w próbce poddanej próbie spęczenia, obliczonej zgodnie z kryterium Cockrofta – Lathama, w osi obciskanej próbki



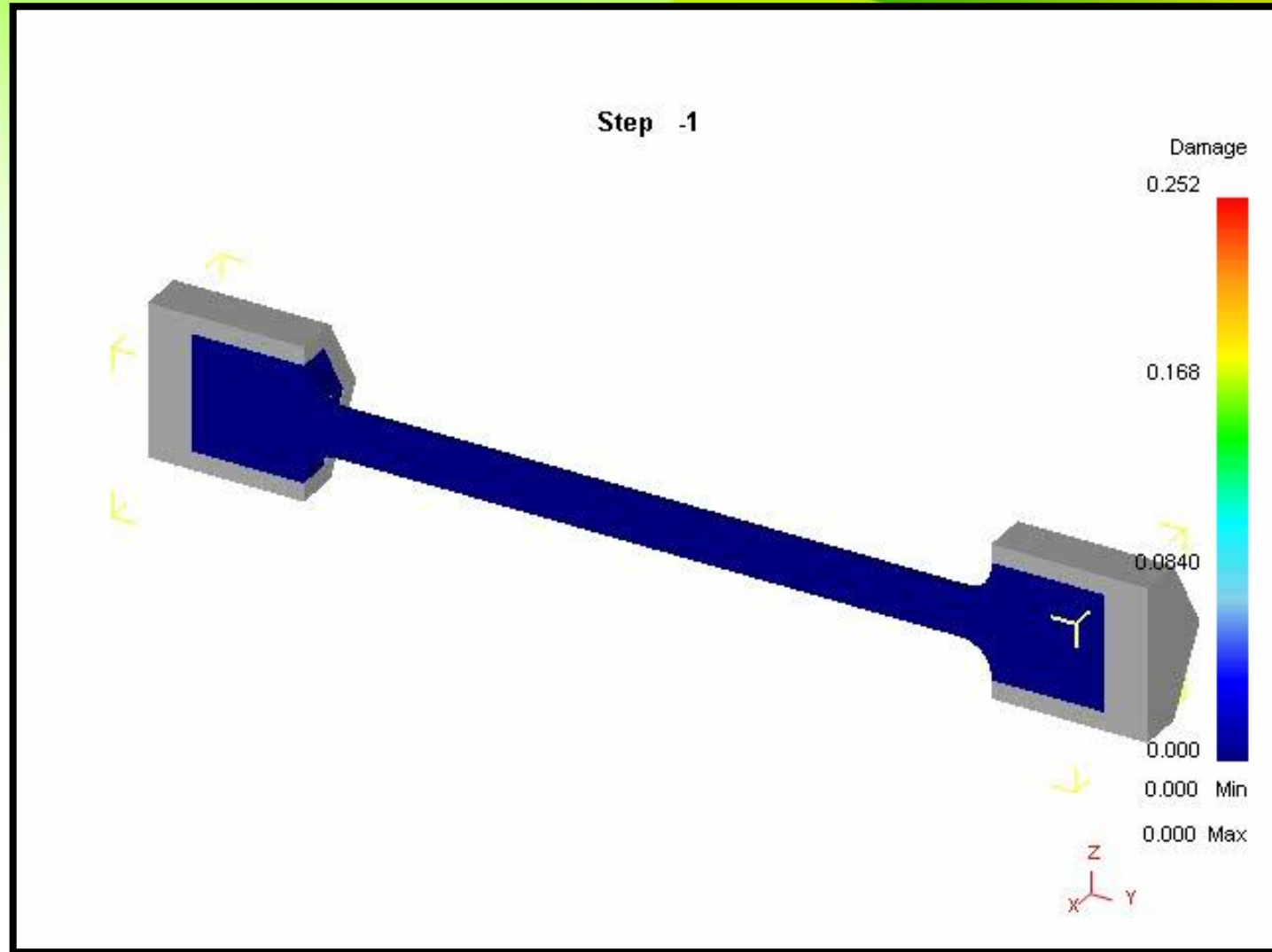
# PRÓBA SKRĘCANIA – wyniki z analizy numerycznej



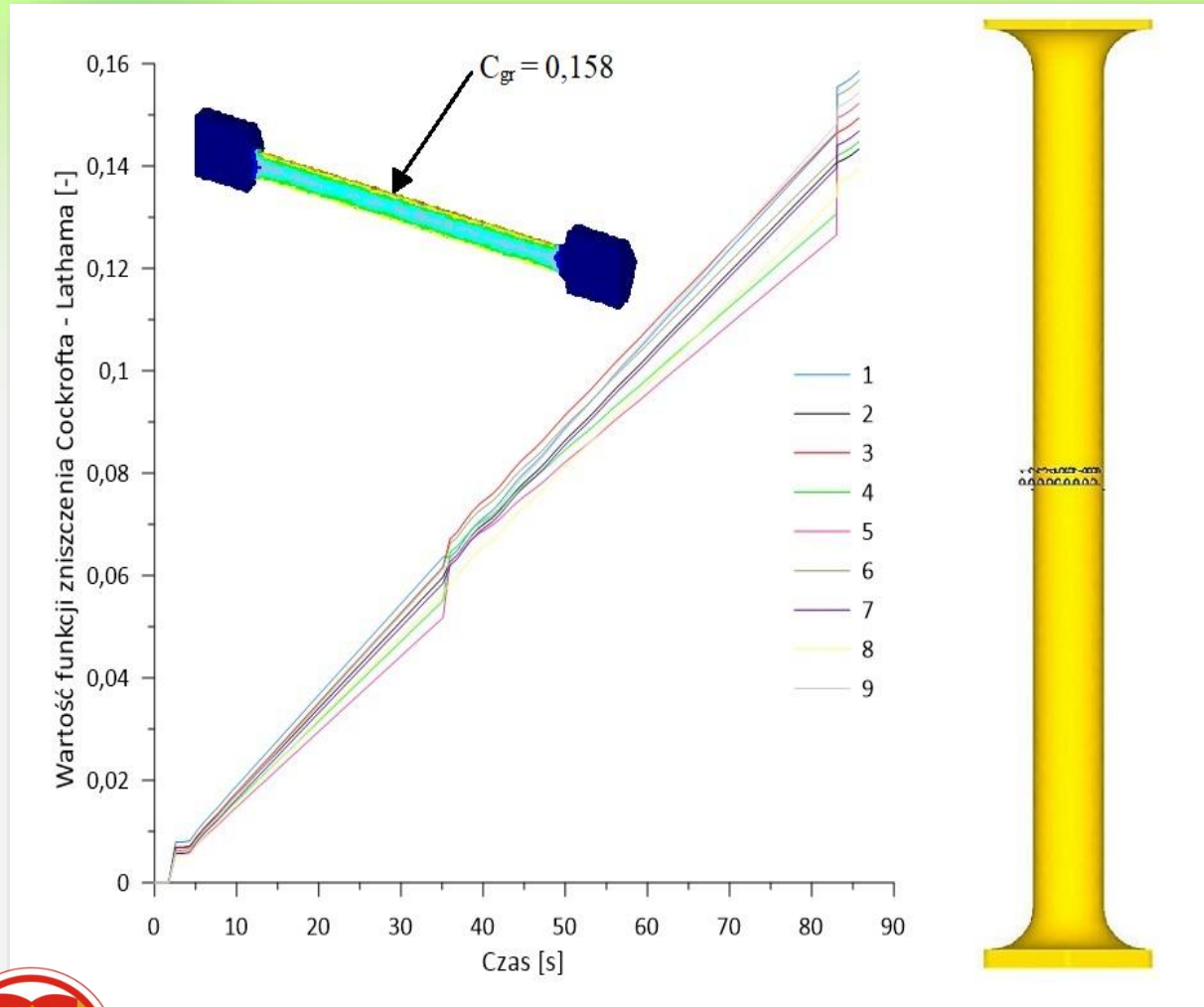
Rysunek 17. Rozkład wartości średnich odkształcenia, szybkości odkształcenia i naprężenia (kolejno od lewej) w próbce z brązu BA1032, prędkość skręcania 500 °/min



# PRÓBA SKRĘCANIA – wyniki z analizy numerycznej



# PRÓBA SKRĘCANIA – wyniki z analizy numerycznej

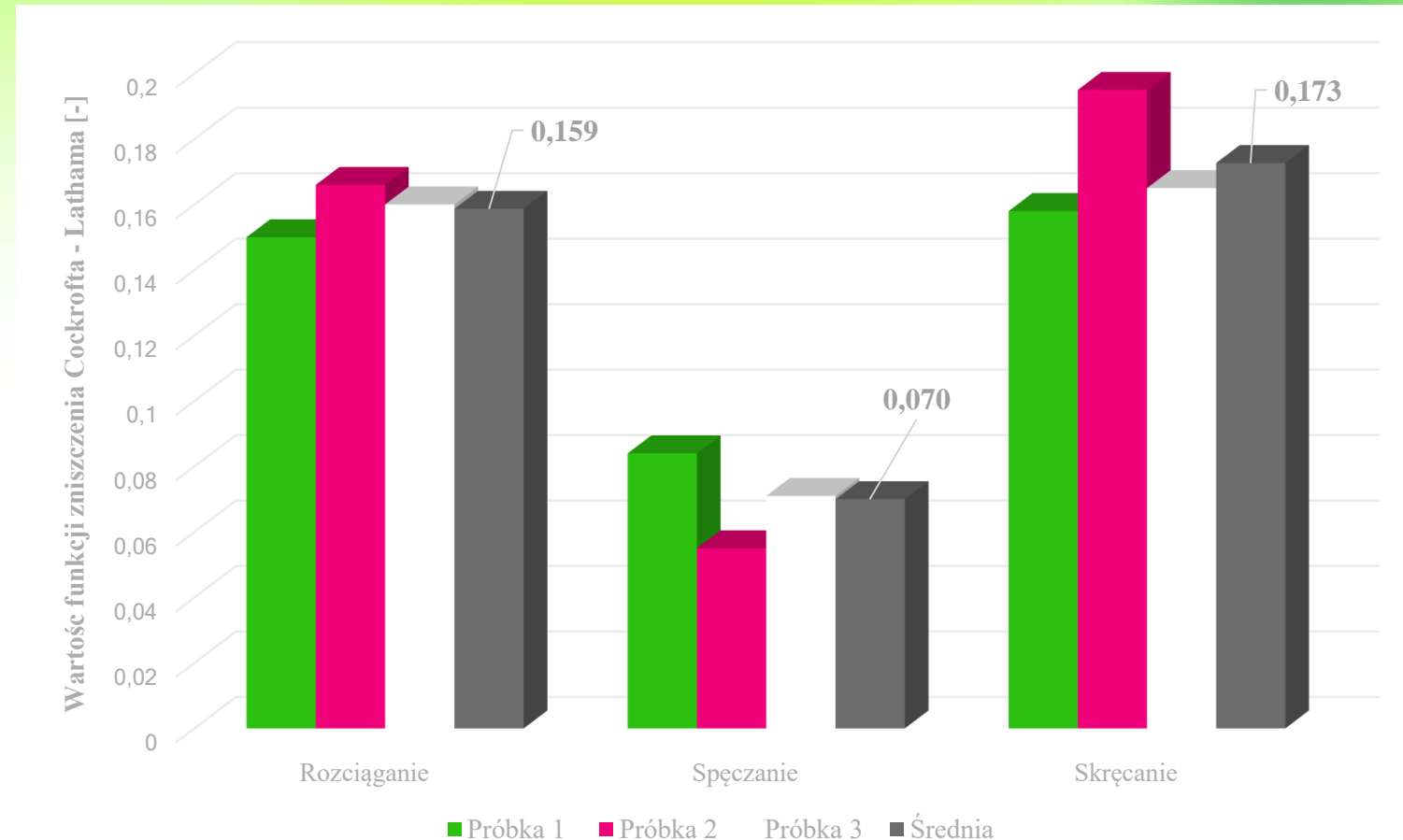


W elemencie poddanym próbie skręcania doszło do pęknięcia. W osi próbki umieszczono 9 sensorów, co 0,89 mm. Sensory nr 1 i 9 leżały na powierzchni bocznej próbki, zaś nr 5 w centrum. Maksymalna wartość funkcji zniszczenia wystąpiła w punkcie 1 i 9. Wartość funkcji zniszczenia z danej próby określono na 0,158.

Rysunek 18. Zmiana wartości funkcji zniszczenia w próbce poddanej próbie skręcania, obliczonej zgodnie z kryterium Cockrofta – Lathama, w osi obciskanej próbki

# Zestawienie wartości granicznych funkcji zniszczenia

Na rysunku 19 przedstawiono zestawienie wartości granicznych wszystkich próbek poddanych próbom. Wartości graniczne funkcji zniszczenia wg znormalizowanego kryterium Cockrofta - Lathama w próbie rozciągania i skręcania są zbliżone do siebie. Wartość z próby spęczania jest około 2,3 razy mniejsza od wartości uzyskanej w próbie rozciągania i 2,4 razy mniejsza niż w próbie skręcania.



Rysunek 19. Zestawienie wartości funkcji zniszczenia w próbach rozciągania, spęczania i skręcania, obliczonej zgodnie z kryterium Cockrofta - Lathama



# PODSUMOWANIE

1. W próbce poddanej próbie rozciąganiu pęknięcie wystąpiło w przewężeniu, w próbce do spęczania pęknięcie wystąpiło pod kątem  $45^\circ$ , zaś w próbce skręcania w pobliżu jednego z uchwytów narzędzia.
2. Siła zarejestrowana w próbce rozciągania jest prawie dwukrotnie mniejsza od siły uzyskanej w próbce spęczania.
3. Funkcja zniszczenia w poszczególnych próbach przyjmuje następujące maksymalne wartości graniczne funkcji zniszczenia według znormalizowanego kryterium Cockrofta - Lathama:
  - Próba rozciągania – 0,159;
  - Próba spęczania - 0,07;
  - Próba skręcania - 0,173.

## Główny wniosek wyciągnięty z badań

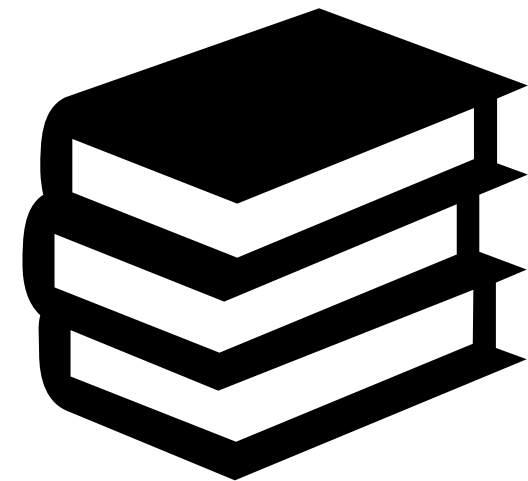
**Wartości krytyczne funkcji zniszczenia C pozwalają na trafne określenie momentu pęknięcia materiału tylko wtedy, gdy stan naprężenia w analizowanym procesie jest zbliżony do stanu naprężenia występującego podczas testu kalibracji.**





# LITERATURA

1. Blicharski M., *Odkształcenie i pękanie*. Wydawnictwo Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie – 2002.
2. Gałkin A., *Badania plastometryczne metali i stopów*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 1990.
3. Hadasik E., Pater Z., *Obróbka plastyczna. Podstawy teoretyczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
4. Li H., Fu M.W., Yang H., *Ductile fracture: experiments and computations*. International Journal of Plasticity, 27, 147-180, 2011.
5. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Zniszczyński A., *The Problem of Material Fracture Prediction in Cross Rolling Processes*. Advances in Science and Technology Research Journal, 12, 184-189, 2018.
6. Pater Z., Samołyk G., *Podstawy teorii i analizy obróbki plastycznej metali*. Politechnika Lubelska, 2011.



# DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

## **Metody kalibracji stosowane do wyznaczania odkształcalności granicznej w przypadkach obciążeń stałych**

**POLITECHNIKA LUBELSKA**  
Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii  
Obróbki Plastycznej  
mgr inż. Patrycja Walczuk - Gągała

---

Projekt „Politechnika Lubelska - Regionalna Inicjatywa Doskonałości”  
- finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo  
Nauki  
i Szkolnictwa  
Wyższego

