Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczny
Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów W10/Z1

Raport Wydziałowego Zakładu Wytrzymałości Materiałów, PWr. 2007
Seria U nr 1/2007

Na prawach rękopisu

LABORATORIUM WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW

Wielokryterialny dobór własności wytrzymałościowych materiałów z uwzględnieniem ich odporności na pękanie K_{IC}

Materiały pomocnicze dla studentów

Opracowali: E.S.DZIDOWSKI, R.JASIŃSKI, G. CHRUŚCIELSKI

Wrocław, 2007

Spis treści

CZĘŚĆ I – OGÓLNE WYTYCZNE DO PROCESU PROJEKTOWANIA
1.1 Wprowadzenie 3
1.2 Analiza systemów technicznych 3
1.3 Proces projektowania 4
1.4 Narzędzia projektowania i dane materiałowe 4
1.5 Funkcja, materiał, kształt i metoda wytwarzania 6
1.6 Dobór materiałów za pomocą wykresów własności 7
CZĘŚĆ II – DOBÓR WŁASNOŚCI MATRIAŁÓW Z UWZGLĘDNIENIEM K_{Ic} 10
2.1 Dobór materiałów ze względu na krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic}.. 10
2.2 Przykład doboru materiału dla konstrukcji szczególnie obciążonych – materiały na zbiorniki ciśnieniowe 11
2.2.1 Określanie wskaźników optymalizujących dobór materiałów 11
2.2.2 Dobór materiałów 13
2.3 Podsumowanie 14
Literatura 15

CZĘŚĆ III – PRAKTYCZNA INSTRUKCJA DLA UŻYTKOWNIKA PROGRAMU CES 5.0 16

CZĘŚĆ I

OGÓLNE WYTYCZNE DO PROCESU PROJEKTOWANIA

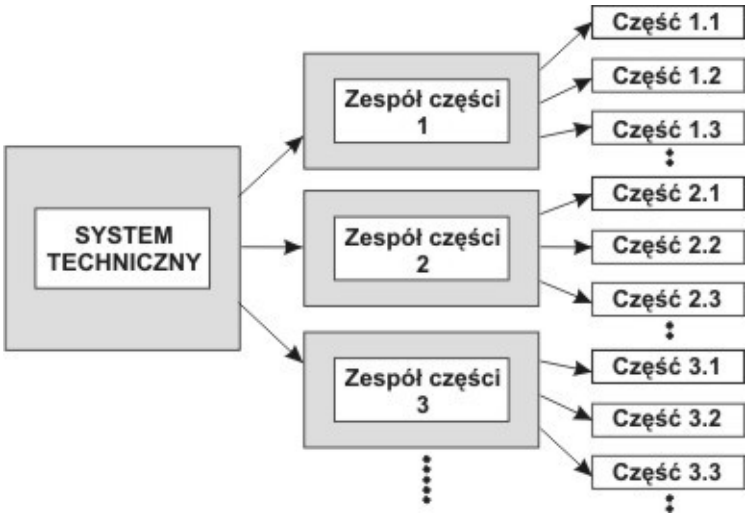
1.1 Wprowadzenie

Podczas projektowania wyrobów obciążonych mechanicznie konstruktor musi rozwiązać problemy związane z prawami fizycznymi, właściwym działaniem urządzenia technicznego i możliwościami jego produkcji. Metoda projektowania zależy przy tym od przyjętego sposobu analizy systemów technicznych. Rozróżnia się trzy rodzaje projektów: projekty oryginalne (całkowicie nowe pomysły), projekty adaptacyjne (ewolucja istniejących produktów) oraz projekty alternatywne (całkowita zmiana formy, tzn. kształtu lub wielkości, bez zmiany funkcji). W żadnym z tych trzech rodzajów projektów nie można ignorować doboru materiału.

1.2 Analiza systemów technicznych

System techniczny składa się z podzespołów i części złożonych w taki sposób, aby mogła być realizowana określona *funkcja* danego wyrobu. System ten może on być opisywany i analizowany wieloma sposobami. Jednym z nich, jest sposób, w którym rozpatruje się przepływ informacji, energii i materiału, przetwarzanych przez układ. Przy tym podejściu przyjmujemy, że system składa się z odpowiednio połączonych podsystemów realizujących funkcje jednostkowe; w rezultacie otrzymuje się strukturę funkcjonalną systemu. Analiza systemu z punktu widzenia jego struktury funkcjonalnej umożliwia lepszą ocenę różnych opcji projektowania, nie jest jednak specjalnie przydatna przy doborze materiału.

Bardziej przydatny jest sposób polegający na rozbiciu systemu na zespoły i części (rys. 1). Stosując takie podejście można uznać, że np. rower jest system technicznym, a koło – podzespołem złożonym z pojedynczych części: szprych, przekładni, obręczy i innych. Każda część jest wykonana z innego materiału.

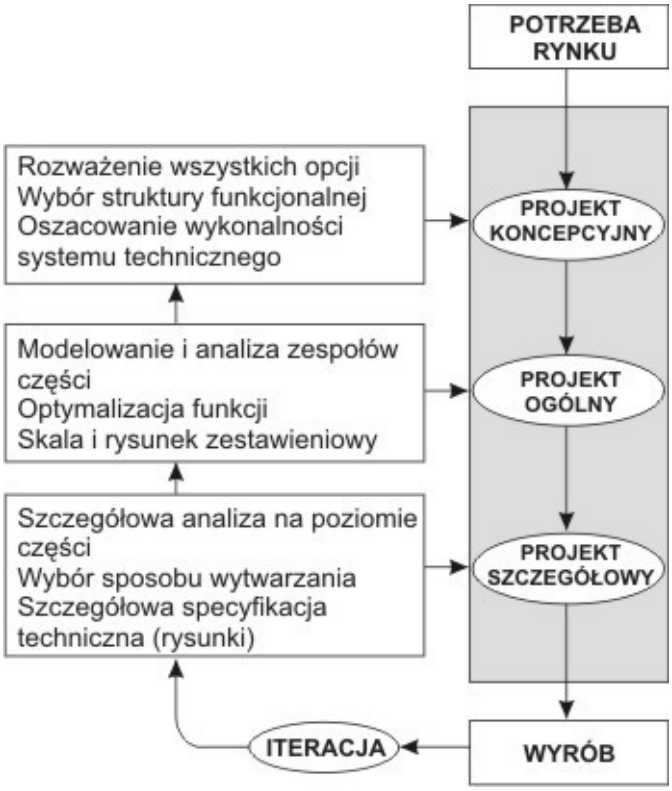


Rys. 1 Analiza systemu technicznego w rozbiciu na zespoły i części.

Doboru materiału dokonuje się na poziomie pojedynczej części. Niektóre części są standardowe i wspólne dla wielu konstrukcji, np. wkręty do drewna, ale nawet wśród nich można wybrać rodzaj materiału (wkręty mogą być mosiężne, ze stali węglowej lub nierdzewnej). Inne części są specyficzne, unikatowe, przeznaczone dla konkretnej konstrukcji. W tej sytuacji projektant musi wybrać materiał, zaprojektować kształty i wreszcie określić metodę wytwarzania. Tak więc istnieje wzajemna zależność pomiędzy funkcją, rodzajem materiału i kształtem wyrobu.

1.3 Proces projektowania

Projektowanie jest procesem iteracyjnym. Punktem wyjścia do projektowania jest potrzeba rynkowa lub pomysł, finałem zaś - produkt zaspokajający tę potrzebę lub urzeczywistniający ideę. Między punktami skrajnymi znajduje się cały szereg stadiów pośrednich, np. projekt koncepcyjny, ogólny i szczegółowy, prowadzących do powstania zbioru specyfikacji definiujących sposób wyprodukowania wyrobu (rys. 2).



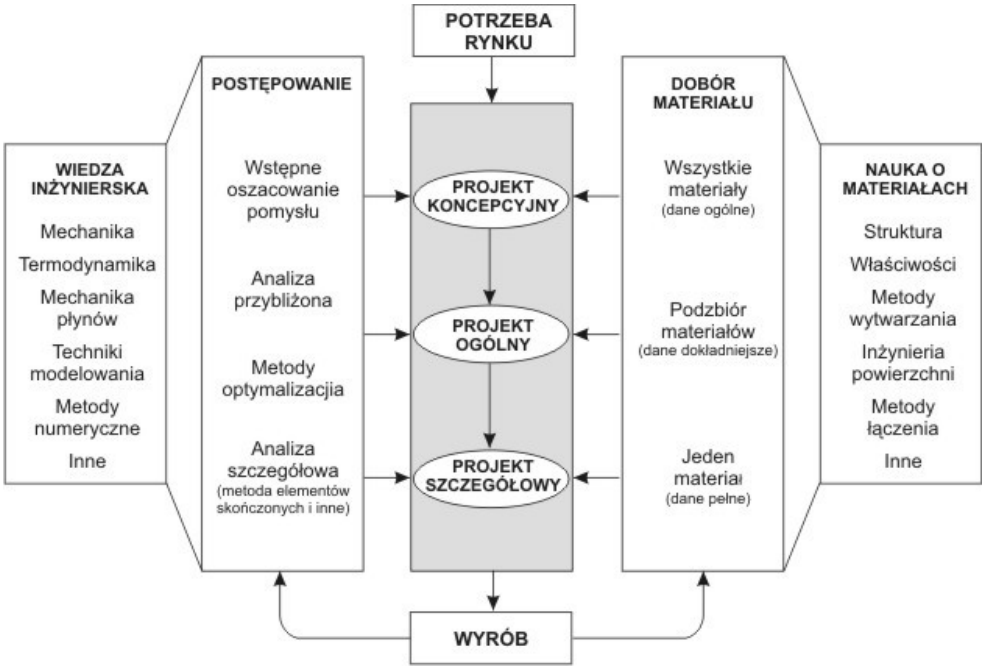
Rys. 2 Ogólny schemat procesu projektowania

W fazie projektu koncepcyjnego stosować można wszelkie alternatywne rozwiązania, zarówno co do zasady działania, jak i struktury funkcjonalnej systemu. Bierze się pod uwagę wpływ różnych wariantów na właściwości użytkowe i koszt wyrobu. Tworzenie projektu ogólnego, przy uwzględnieniu struktury funkcjonalnej, obejmuje analizę funkcjonowania wyrobu na niższym poziomie - poziomie części. Wyroby w tej fazie mają zdefiniowany kształt, wielkość i materiał. Brane są pod uwagę zakresy naprężeń, temperatur oraz inne czynniki środowiska ich pracy. Tak stworzony projekt ogólny jest z kolei punktem wyjścia do opracowania projektu szczegółowego, w którym powstają szczegółowe specyfikacje dla każdej części. Elementy najbardziej odpowiedzialne są poddawane szczegółowej analizie z punktu widzenia ich warunków pracy, tzn. analizie mechanicznej i termicznej, np. metodą elementów skończonych. W celu osiągnięcia najlepszych właściwości użytkowych stosuje się metody optymalizacji części i ich zespołów, dobiera się materiały, analizuje drogę, jaką części przechodzą w procesie produkcyjnym, oraz szacuje koszty. Tworzenie projektu szczegółowego kończy się powstaniem szczegółowej dokumentacji produkcyjnej.

1.4 Narzędzia projektowania i dane materiałowe

Do stworzenia projektu służą określone narzędzia projektowania. Przedstawione one być mogą jako elementy wejściowe do całego systemu projektowania (rys. 3). Po lewej stronie rysunku 3 znajdują się narzędzia naukowych metod analizy, modelowania i optymalizacji projektu. Są nimi podstawowe prawa i zależności mechaniki, termodynamiki, technik modelowania itd. W coraz większym stopniu rutynowe czynności projektanckie ułatwia

komputerowe wspomaganie projektowania (CAD) oraz możliwości użycia baz danych zawierających informacje o standardowych częściach i ich zespołach. Wraz z rozwojem projektu stosowanie tych narzędzi jest coraz intensywniejsze. Przy powstawaniu projektu koncepcyjnego przeprowadza się analizy i modelowania przybliżone. Na dalszych etapach - analizy te są coraz bardziej wyrafinowane i dokładne.



Rys. 3 Schemat szczegółowy procesu projektowania

Dobór materiału towarzyszy procesowi projektowania na wszystkich etapach (rys. 3 – kolumna prawa). Ogromna różnorodność dostępnych materiałów sprawia jednak, że wybór jednego, konkretnego materiału jest często procesem bardzo złożonym. Rozwijająca się standaryzacja umożliwia wprawdzie jego skracanie, ale z drugiej strony nieustannie pojawiają się materiały nowe – lepsze stopy, coraz wytrzymalsze polimery i ceramiki, coraz bardziej złożone kompozyty. Projektant potrzebuje więc dodatkowych wskazówek, pomagających mu poruszać się po tym labiryncie różnych możliwości.

Wskazówkami tymi są ograniczenia, jakie w każdym ze stadiów procesu projektowego stawia się przy wyborze materiału i jakie powstają jako rezultat optymalizacji właściwości użytkowych i kosztów wyrobu. Pierwsze ograniczenia narzuca się już w projekcie wstępnym; są to: temperatura pracy, środowisko itp. Grupa materiałów mieszcząca się w nich kandyduje do następnego stadium. Zawężanie tej listy materiałów wymaga teraz zastosowania jakichś technik optymalizacji; problem nie polega już na tym, który materiał spełnia wymagania, ale który spełni je lepiej. Pojawia się konieczność iteracji; rzadko kiedy materiał o najlepiej pasujących właściwościach będzie materiałem, który najtaniej można uformować, łączyć i obrobić wykańczające. Potrzebna jest optymalizacja innego rodzaju — znalezienie kompromisu między właściwościami i kosztami całkowitymi. Tworzenie projektu szczegółowego możliwe jest dopiero wtedy, gdy lista możliwych materiałów dla każdej części jest zredukowana do jednego lub do bardzo niewielu.

Dane materiałowe są potrzebne na każdym etapie procesu projektowego. Rodzaj danych niezbędnych we wczesnych etapach różni się znacznie, zarówno co do dokładności, jak i zakresu, od tych, które są potrzebne później (rys. 3 – strona prawa). Tworząc projekt koncepcyjny, projektant potrzebuje przybliżonych danych dla możliwie największej liczby materiałów. Wszystkie możliwości są jeszcze otwarte: dla jednej opcji najlepszy może być materiał polimerowy, a dla innej metaliczny, pomimo że chodzi o tę samą funkcję. Na tym etapie problemem nie jest dokładność danych, lecz tylko ich przedział i dostępność. Z drugiej

strony istnieje potrzeba, aby zakres danych był na tyle szeroki, aby pozostawić projektantowi jak największą swobodę w rozpatrywaniu alternatywnych rozwiązań.

Przy opracowywaniu projektu ogólnego są potrzebne dane o większym stopniu szczegółowości i dokładności, lecz dla znacznie węższego podzbioru wstępnie wybranych materiałów. Można je znaleźć w podręcznikach, poradnikach lub komputerowych bazach danych. Przedstawiono w nich w różnej postaci - liczb, wykresów i porównań - właściwości pojedynczych grup materiałów, np. metalicznych, co umożliwia wybór uwzględniający szczegóły niedostępne w opracowaniach obejmujących wszystkie materiały.

W etapie końcowym, tzn. projekcie szczegółowym, wymagana jest jeszcze większa dokładność i szczegółowość, lecz już tylko dla jednego bądź nielicznych materiałów. Takich danych najlepiej szukać w publikacjach wydawanych przez producenta konkretnego materiału. Właściwości takiego materiału (np. polietylenu) mogą różnić się nieco od siebie w zależności od jakiego są producenta. W fazie projektowania szczegółowego należy zidentyfikować producenta materiału i dane materiałowe właśnie od niego używać do ewentualnych obliczeń. Niekiedy jednak to nie wystarczy i jeżeli część jest wyjątkowo odpowiedzialna (tzn. jej uszkodzenie w takim czy innym sensie mogłoby być katastrofalne), pod rozwagę należy wziąć możliwość wykonania własnego pomiaru krytycznej właściwości na próbce materiału od wybranego producenta.

Problem materiałowy nie kończy się z chwilą rozpoczęcia produkcji. Wyroby ulegają uszkodzeniom w czasie eksploatacji. Takie uszkodzenia niosą w sobie cenne informacje. Producent, który nie interesuje się zbieraniem danych o wadach własnego produktu, jest nieodpowiedzialny. Prawie zawsze dane takie wskazują na jakiś błąd związany z zastosowanym materiałem. Pewna zmiana w konstrukcji bądź zmiana materiału może tę wadę wyeliminować.

1.5 Funkcja, materiał, kształt i metoda wytwarzania

Wyboru materiału nie można oddzielić od zaprojektowanego kształtu. Używamy słowa kształt do opisu kształtu zewnętrznego i gabarytów (makrokształtu) oraz, w razie potrzeby, kształtów wewnętrznych - jak w plastrze miodu lub strukturze komórkowej (mikrokształtu). Aby kształt powstał, musimy zastosować procesy kształtowania, które ogólnie nazwiemy wytwarzaniem. Obejmują one procesy kształtowania pierwotnego (jak odlewanie czy kucie), procesy zdejmowania nadmiaru materiału (obróbka skrawaniem), wykańczania (polerowanie) oraz łączenia (jak spawanie). Jak więc z tego wynika, istnieje ścisła zależność między funkcją, rodzajem materiału, kształtem i metodą wytwarzania wyrobu (rys. 4).

Rys. 4 Zależność między funkcją, materiałem, metodą wytwarzania i kształtem wyrobu.

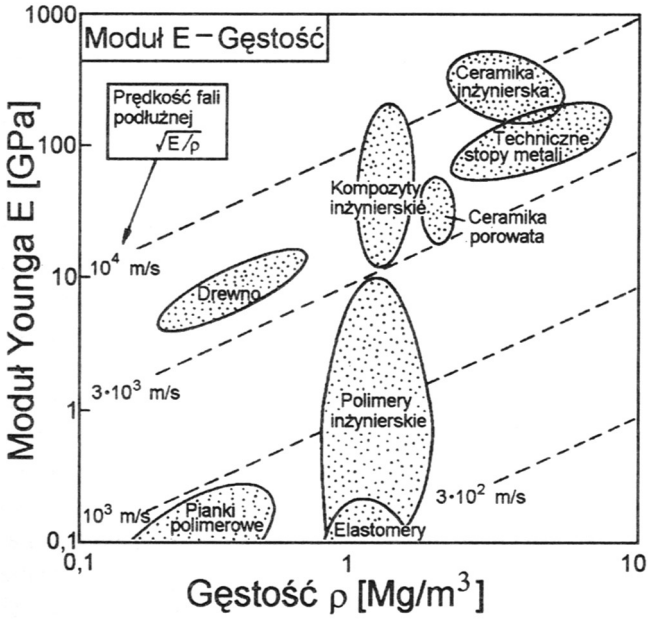
Funkcja narzuca dobór materiału, a kształt zostaje zaprojektowany tak, aby przy użyciu odpowiedniego materiału, spełniał określoną funkcję. Metoda wytwarzania jest uzależniona od pewnych właściwości materiału; np. plastyczności, skrawalności, spawalności, podatności do obróbki cieplnej. Zależy ona również od kształtu, gdyż kształt powstaje w wyniku jej zastosowania; od metody wytwarzania zależą też konkretne wymiary, ich dokładność i koszt wyrobu. Zależności są wielostronne: wymagany kształt ogranicza dobór materiału, podobnie jak i metody wytwarzania. Wraz ze wzrostem wyrafinowania projektu rosną wymagania i omawiane zależności stają się silniejsze. Jak więc widać, zależności między funkcją, materiałem, kształtem i wytwarzaniem są niezwykle istotne z punktu widzenia procedury doboru materiału.

1.6 Dobór materiałów za pomocą wykresów własności

Jest rzeczą oczywistą, że zakres zastosowania danego materiału konstrukcyjnego ograniczony jest przez jego właściwości mechaniczne. Ponadto, działanie i funkcjonalność jakiejkolwiek części lub urządzenia rzadko tylko zależą od jednej właściwości materiału. Na ogół jest to kombinacja (lub kilka kombinacji) istotnych w danym przypadku właściwości: np. w projektowaniu lekkich konstrukcji istotny jest stosunek wytrzymałości do gęstości (σ_f/ρ) lub sztywności do gęstości (E/ρ). Stwierdzenie takiej zależności pozwoliło na przyjęcie koncepcji opracowania wykresów przedstawiających wybraną właściwość w zestawieniu z inną. Wykresy takie są więc pewnego rodzaju mapami, na których pokazano, w jakich polach mieszczą się właściwości różnych grup materiałów i poszczególnych materiałów. Ich zastosowanie jest wielorakie. Dostarczają one w skondensowanej i jednocześnie przystępnej formie wiele informacji, pozwalając na porównanie kombinacji właściwości poszukiwanych z przewidywanymi dla różnych materiałów. Należą one również do technik optymalizacyjnych, na których oparta jest procedura doboru materiałów i metod wytwarzania.

Każda właściwość materiału inżynierskiego ma charakterystyczny zakres wartości. W przypadku większości rozpatrywanych właściwości, takich jak: moduły sprężystości, wytrzymałość czy przewodność cieplna, zakres ten jest szeroki - w przybliżeniu obejmuje zwykle pięć rzędów wartości.

Dogodnym sposobem ilościowej prezentacji właściwości materiałów są *wykresy doboru materiałów*, przedstawione przykładowo na rys. 5. Jedna z właściwości (w tym przypadku moduł Younga E) jest zestawiona z inną (tutaj gęstością ρ) na wykresie z podziałką logarytmiczną.



Rys. 5 Wykres właściwości materiałów: moduł Younga E w zestawieniu z gęstością ρ.

Zakres wartości na osiach wykresu jest tak dobrany, aby objąć wszystkie materiały, od najlżejszych, najdelikatniejszych pianek do najwytrzymalszych i najcięższych metali. Można zauważyć, że dane dla określonego rodzaju materiałów (np. polimerów) skupiają się w pewnym obszarze wykresu. We wszystkich przypadkach właściwości grupy materiałów mieszczą się w znacznie mniejszym przedziale niż pełny zakres właściwość wszystkich materiałów. Dane dotyczące poszczególnych rodzajów materiałów są na wykresach obwiedzione liniami zamkniętymi i zawierają informacje o wszystkich materiałach określonego rodzaju.

Opisany sposób ilościowej prezentacji właściwości materiałów może stać się bardziej użyteczny, przy odpowiednim doborze osi i podziałek. Na przykład, wiedząc, że prędkość dźwięku w ciałach stałych zależy od modułu Younga E i gęstości ρ, prędkość podłużnej fali, można zapisać równaniem:

$$v = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$$

lub, po zlogarytmowaniu:

$$\log E = \log \rho + 2 \log v$$

Dla ustalonej wartości ν graficznym przedstawieniem tego równania jest na rys. 5 linia prosta o nachyleniu równym l. Umożliwia to wzbogacenie wykresu o *linie stałej prędkości rozchodzenia się fali*. Są one zbiorem równoległych linii ukośnych, łączących materiały, w których fale podłużne rozchodzą się z jednakową prędkością. Za ich pomocą na wszystkich wykresach doboru materiałów uwzględniono podobne, ważne zależności, a także wskaźniki umożliwiające optymalne projektowanie i dobór materiałów.

Spośród wielu właściwości mechanicznych i cieplnych wybrano osiemnaście, o największym znaczeniu dla projektanta (tab. 1). Obejmują one gęstość, moduły sprężystości, wytrzymałość, odporność na pękanie, przewodność i rozszerzalność cieplną oraz dyfuzyjność.

Tab. 1 Właściwości materiałów inżynierskich uwzględnianie w procesie projektowania i doboru materiałów

Rodzaj właściwości	**Właściwość**	**Symbol**	**Jednostka**
Ogólne	Koszt	C_R	-
	Gęstość	ρ	*Mg/m3*
Mechaniczne	Moduły sprężystości	*E, G, K*	*GPa*
	Naprężenie (w zależności od materiału: granica plastyczności, wytrzymałość, naprężenie pękania)	σ_f	*MPa*
	Wiązkość (ang. toughness)	G_c	*kJ/m2*
	Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń (odporność na kruche pękanie)	K_{IC}	$MN/m^{3/2}$
	Współczynnik tłumienia drgań	η	-
	Współczynnik zmęczenia	f	-
Cieplne	Przewodność cieplna	λ	*W/(mK)*
	Współczynnik wyrównania temperatury	a	m^2/s
	Ciepło właściwe	c_p	*J/(kg K)*
	Temperatura topnienia	T_m	*K*
	Temperatura zeszklenia	T_g	*K*
	Współczynnik rozszerzalności cieplnej	α	K^{-1}
	Odporność na szoki cieplne	ΔT	*K*
	Odporność na pełzanie	-	-
Cierne	Stała Archarda	K_A	MPa^{-1}
Korozyjne/utleniające	Szybkość korozji	-	-
	Stała parabolicznej szybkości utleniania	K_p	m^2/s

Na wykresach przedstawione są dane o tych właściwościach dla dziewięciu grup materiałów (osiem grup z rys. 5 plus szkło). W obrębie pola zajmowanego na wykresie przez każdy rodzaj materiału uwzględniono również informacje dla reprezentatywnego ich zbioru. Zbiór ten składa się z materiałów najpowszechniej i najczęściej stosowanych, wybranych tak, aby został objęty pełny zakres właściwości danej grupy. W ten sposób obwiednia, przedstawiająca na wykresie jeden z rodzajów materiałów, obejmuje dane o wszystkich materiałach należących do danego rodzaju materiałów.

Na wykresach pokazano zakres wartości każdej właściwości każdego materiału. Czasem jest on wąski - np. moduł Younga miedzi tylko o kilka procent różni się od wartości średniej, w zależności od czystości, tekstury i innych podobnych cech tego metalu. Zdarza się, że zakres ten jest szeroki - np. wytrzymałość korundu może zmieniać się nawet ponad stokrotnie pod wpływem zmian porowatości, wielkości ziarna itp.

Obróbka cieplna i odkształcenie plastyczne mają zasadniczy wpływ na wartość granicy plastyczności, zdolność tłumienia drgań i odporność na pękanie metali, natomiast stopień krystaliczności i usieciowania - na moduł sprężystości polimerów. Właściwości silnie zależne od struktury pojawiają się na wykresach w formie wydłużonych „pęcherzyków", leżących wewnątrz obwiedni zaznaczonych grubszymi liniami. Za ich pomocą pokazano typowy zakres właściwości pojedynczych materiałów.

CZĘŚĆ II

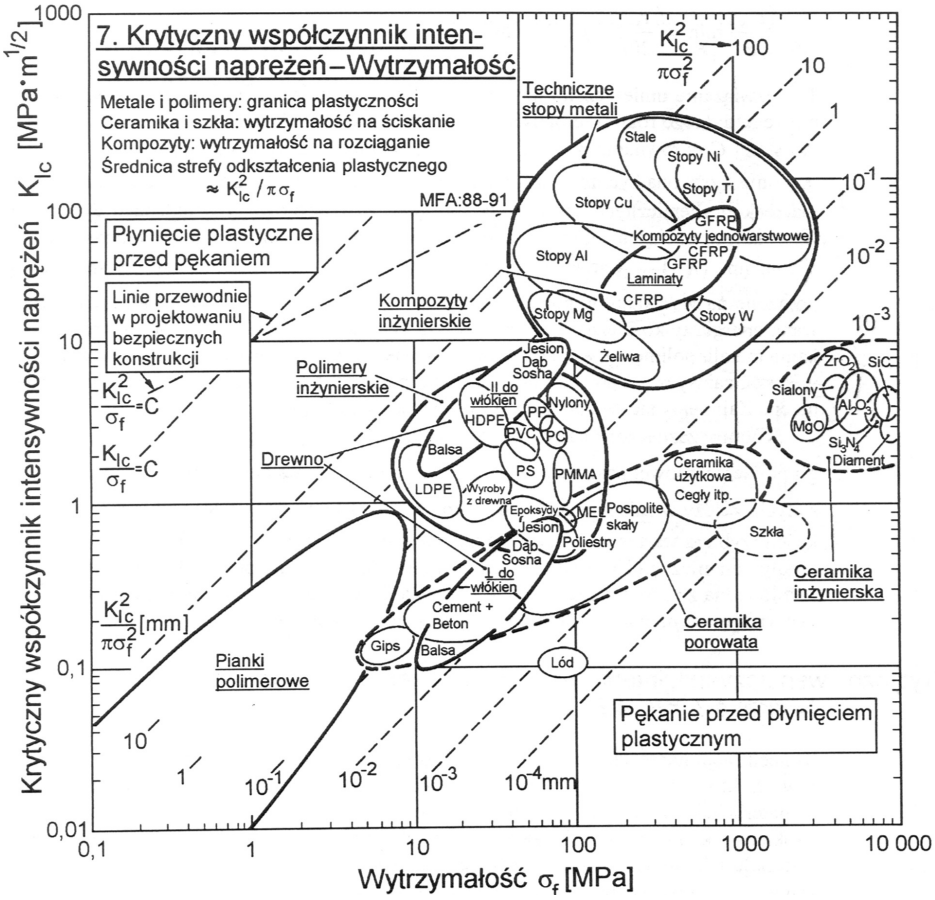
DOBÓR WŁASNOŚCI MATRIAŁÓW Z UWZGLĘDNIENIEM K_{Ic}

2.1 Dobór materiałów ze względu na krytyczny współczynnik intensywności naprężeń

Uwzględnianie odporności materiału na pękanie przy doborze materiałów konstrukcyjnych jest w wielu przypadkach koniecznością. Dotyczy to szczególnie przypadków, gdy element konstrukcyjny pracować ma w warunkach obciążeń zmiennych (zmęczeniowych), gdzie dojść może do inicjacji i propagacji szczeliny zmęczeniowej. Koncentracja naprężeń w okolicy wierzchołka pęknięcia wywołuje powstawanie obszarów, w których zachodzą określone zjawiska mechaniczne: odkształcenie plastyczne w materiałach ciągliwych, mikropęknięcia w ceramice, rozwarstwienia czy wyciągnięcia włókien w kompozytach. W tak rozumianych strefach praca pokonuje opór plastyczny materiału lub siły tarcia. Ilość energii rozproszonej zmienia się wówczas wraz z wytrzymałością materiału oraz rodzajem i wielkością strefy odkształcenia *d*. Średnicę tej strefy można obliczyć, przyrównując pole naprężeń pęknięcia ($\sigma = K / \sqrt{2\pi r}$) dla $r = d/2$ do naprężenia uplastyczniającego σ_f :

$$d = \frac{K_{IC}^2}{\pi \sigma_f^2} \tag{1}$$

Na rys. 6 przedstawiono wykres zmienności krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} w zależności od granicy plastyczności σ_f. Z wykresu widać, że wielkość strefy odkształcenia *d* (linie przerywane) zmienia się w ogromnym zakresie – od rozmiarów atomowych dla kruchej ceramiki i szkieł do prawie 1 m dla najbardziej plastycznych metali. Przy stałej wielkości strefy *d* odporność na kruche pękanie wykazuje tendencję wzrostu wraz z wytrzymałością – z tego względu grupy materiałów skupiają się wokół przekątnej wykresu.



Rys. 6 Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń w zestawieniu z granicą plastyczności σ_f.
Linie przerywane wyznaczają przybliżoną średnicę strefy odkształcenia w sąsiedztwie wierzchołka szczeliny.
Linie przewodnie umożliwiają dobór materiałów na szczególnie obciążone konstrukcje.

Wykres zależności K_{IC} od naprężenia uplastyczniającego σ_f ma zastosowanie przy doborze materiałów zapewniających bezpieczeństwo użytkowania szczególnie obciążonych konstrukcji. Zagadnienie te zobrazować można na przykładzie zbiornika ciśnieniowego.

2.2 Model doboru materiału dla konstrukcji szczególnie obciążonych – na przykładzie zbiornika ciśnieniowego

Zbiorniki ciśnieniowe, począwszy od najprostszego pojemnika aerozolowego do największych kotłów, projektowane są ze względów bezpieczeństwa tak, by ich ścianki odkształcały się plastycznie lub przeciekały przed pęknięciem zbiornika. Szczegóły metody projektowania w obydwu przypadkach są odmienne. Małe zbiorniki ciśnieniowe są zwykle projektowane tak, aby odkształcały się plastycznie pod wpływem ciśnienia na tyle niskiego, by nie powodowało ono rozprzestrzeniania się jakiegokolwiek mikropęknięcia występującego w ściankach zbiornika („płynięcie plastyczne przed pęknięciem"). Zniekształcenie zbiornika wywołane plastycznym płynięciem materiału jego ścianek może być łatwo ujawnione, a ciśnienie gazu obniżone do bezpiecznego poziomu. Dla dużych zbiorników ciśnieniowych takie postępowanie może okazać się niemożliwe. W tym przypadku bezpieczną konstrukcję uzyskuje się, projektując ścianki o grubości niniejszej od długości najmniejszego mikropęknięcia zdolnego do rozprzestrzeniania się („przeciek przed pęknięciem"). Wyciek ze zbiornika jest łatwy do stwierdzenia, co pozwala stopniowo obniżać ciśnienie, aż do bezpiecznej jego wartości.

Oba z przedstawionych tu kryteriów prowadzą do nieznacznie różnych wskaźników funkcjonalności, ale zasadniczo do takiego samego doboru materiałów.

2.2.1 Określanie wskaźników optymalizujących dobór materiałów

Naprężenie w ściance cienkościennego, kulistego zbiornika ciśnieniowego o promieniu R (rys.7) wynosi

$$\sigma = \frac{pR}{2t} \tag{2}$$

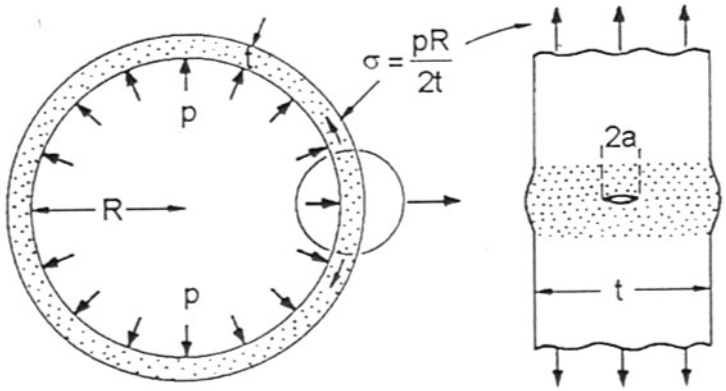
Grubość ścianki t zbiornika ciśnieniowego jest dobierana tak, aby dla danego ciśnienia roboczego p naprężenie to było mniejsze od granicy plastyczności σ_f materiału ścianki. Małe zbiorniki ciśnieniowe mogą być badane metodami ultradźwiękowymi, rentgenowskimi lub sprawdzone w próbnych testach eksploatacyjnych, w celu stwierdzenia, czy nie zawierają mikropęknięcia lub wady o średnicy większej niż $2a_C$. W takim przypadku, zgodnie ze wzorem (1), naprężenie wywołujące propagację pęknięcia wynosi

$$\sigma = \frac{CK_{IC}}{\sqrt{\pi\, a_C}} \tag{3}$$

gdzie C jest stałą, równą w przybliżeniu jedności.

Zbiornik jest bezpieczny, gdy naprężenie robocze w jego ściankach nie przekracza wartości dopuszczalnej, określonej przez wzór (3). Bezpieczniej jest jednak, jeżeli założy się, że mikropęknięcie nie może rozprzestrzeniać się nawet wówczas, gdy naprężenie osiągnie wartość granicy plastyczności. W tych warunkach ścianki zbiornika będą się wolno odkształcać w sposób umożliwiający ujawnienie zniekształcenie zbiornika. Warunek ten opisuje się równaniem, w którym w miejsce σ wstawia się wartość granicy plastyczności σ_f:

$$\pi\, a_C \le C^2 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_f} \right)^2 \tag{4}$$



Rys. 7 Zbiornik ciśnieniowy, w którego ściance występuje wada.
Ścianki bezpiecznego zbiornika niskociśnieniowego powinny odkształcać się plastycznie przed jego pęknięciem.
Zbiornik wysokociśnieniowy powinien natomiast przeciekać, zanim nastąpi jego pęknięcie

Dopuszczalną wielkość mikropęknięcia można więc maksymalizować poprzez dobór materiału o największej wartości wskaźnika M_1:

$$M_1 = \frac{K_{IC}}{\sigma_f} \tag{5}$$

Duże zbiorniki ciśnieniowe nie zawsze mogą być zbadane metodami rentgenowskimi lub ultradźwiękowymi, a ich próbne badania eksploatacyjne mogą być niepraktyczne. Ponadto, mikropęknięcie może wolno powiększać się w wyniku korozji lub pod wpływem cyklicznych obciążeń. Powoduje to, że nie wystarcza wykonanie badań w początkowej fazie eksploatacji zbiornika.

Bezpieczeństwo eksploatacji dużego zbiornika ciśnieniowego można osiągnąć wówczas, gdy mikropęknięcie przebiegające przez całą grubość ścianki jest cały czas stabilne. Wyciek spowodowany takim pęknięciem może być bowiem łatwo ujawniony. Uzyskuje się to, gdy naprężenie w ściance zbiornika jest zawsze mniejsze lub równe

$$\sigma = \frac{CK_{IC}}{\sqrt{\pi \frac{t}{2}}} \tag{6}$$

Grubość ścianki *t* zbiornika ciśnieniowego była zaprojektowana oczywiście tak, aby zbiornik wytrzymał ciśnienie *p,* nie ulegając odkształceniu plastycznemu. Z równania (2) wynika, że

$$t \geq \frac{pR}{2\sigma_f} \tag{7}$$

Wstawiając to wyrażenie do równania (6) i uwzględniając, że $\sigma = \sigma_f$, otrzymuje się

$$\frac{\pi\, pR}{4C^2} = \left(\frac{K_{IC}^2}{\sigma_f}\right) \tag{8}$$

Wynika z tego, że największe ciśnienie wytrzyma zbiornik wykonany z materiału o największej wartości wskaźnika M_2:

$$M_2 = \frac{K_{IC}^2}{\sigma_f} \tag{9}$$

Wśród materiałów o dużych wartościach obydwu wyznaczonych wskaźników funkcjonalności M_1 i M_2 znaleźć można oczywiście materiały o bardzo małej granicy

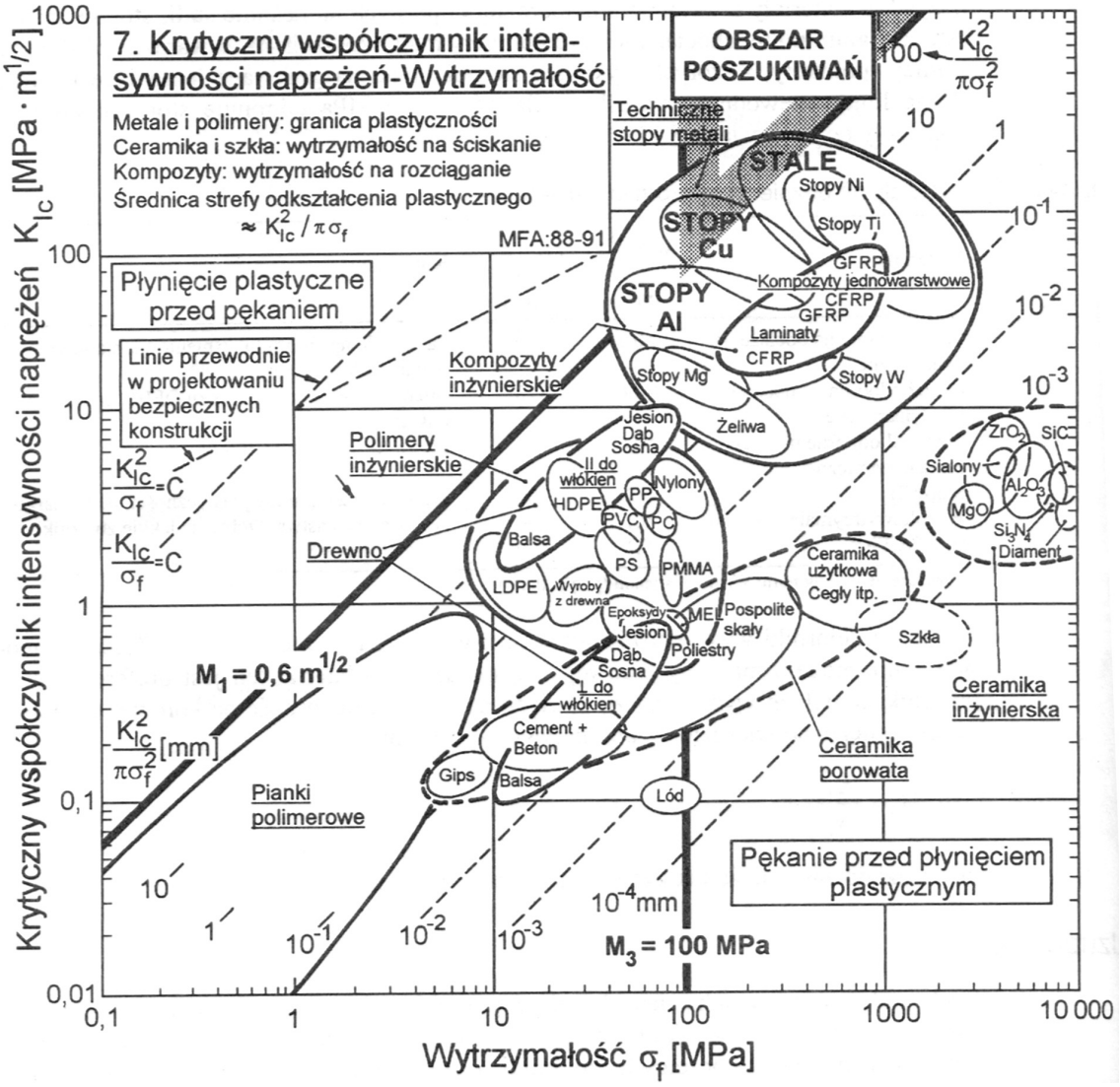
plastyczności. Przykładem takiego materiału jest ołów – posiada on duże wartości obydwu wskaźników, a jednak nie wybralibyśmy go na zbiorniki ciśnieniowe. Ścianki zbiorników muszą być bowiem tak cienkie, jak to jest tylko możliwe, ze względów ekonomicznych oraz wymaganej lekkości konstrukcji. Ponieważ najcieńsze ścianki można wykonać z materiału o największej granicy plastyczności (równanie 7), wartość σ_f będzie trzecim ze wskaźników, które będziemy maksymalizować:

$$M_3 = \sigma_f \tag{10}$$

Wprowadzenie trzech wskaźników doboru materiału pozwala znacznie zawęzić obszar poszukiwań.

2.2.2 Dobór materiałów

Po ustaleniu kryteriów doboru materiału kryteria te nanosi się na wykres zależności σ_f - K_{IC} w postaci linii przewodnich (rys.8). Każde z kryteriów tworzy wówczas całą rodzinę linii o tym samym nachyleniu – w naszym przypadku będą to linie o nachyleniu l i 1/2 oraz linie pionowe. Na rys.3 rodzina takich linii pokazana jest na przykładzie kryterium „plastycznego płynięcia przed pęknięciem".



Rys. 8 Wykres zależności σ_f - K_{IC} wraz z liniami przewodnimi odpowiadającymi wybranym kryteriom doboru materiałów na zbiorniki ciśnieniowe. Na rysunku zaznaczono trójkątny „obszar poszukiwań" stanowiący efekt zastosowania dwóch kryteriów doboru, opisanych wskaźnikami M_1 i M_3. Kryterium opisane wskaźnikiem M_3 prowadzi zasadniczo do takiego samego doboru materiałów.

Praktyczne znaczenie przebiegu linii przewodnich sprowadza się do wniosku, że każda z linii ukośnych, odpowiadająca wskaźnikowi $M_1 = K_{IC}/\sigma_f = C$ łączy materiały o jednakowej funkcjonalności, oraz że wszystkie materiały leżące ponad linią są według tego kryterium lepsze od materiałów leżących pod linią. Linia przedstawiająca na wykresie wskaźnik $M_1 = 0{,}6$ $m^{1/2}$ (zaznaczona jako pogrubiona) wyłącza na przykład wszystkie materiały z wyjątkiem najbardziej odpornych na pękanie stali, stopów miedzi i stopów aluminium (chociaż niektóre polimery mają wskaźnik M_1 o wartości bliskiej tej granicy; są to polimery, z których wykonuje się pojemniki na napoje spożywcze). Takie położenie linii przewodniej, pozostawiające tylko nieliczną grupę materiałów spełniających warunki kryterium, uważać będziemy za decydującą o wyborze materiałów (ale tylko według tego jednego kryterium). Druga linia przewodnia, wykreślona dla $M_3 = 100$ MPa, eliminuje z otrzymanej grupy materiałów stopy aluminium. Jak się dalej okazuje, stopy aluminium nie spełniały by również warunku wyznaczonego przez trzecie kryterium, określone wskaźnikiem M_2.

Wyniki przeprowadzonego wyboru materiałów porównać można z zestawieniem rzeczywistych materiałów stosowanych na zbiorniki ciśnieniowe, podanym w tabeli 2.

Tab. 2 Materiały stosowane na zbiorniki ciśnieniowe

Materiał	$M_1 = K_{IC}/\sigma_f$ [$m^{1/2}$]	$M_3 = \sigma_f$ [MPa]	Komentarz
Stale odporne na obciążenia dynamiczne	>0,6	300	– stosowana standardowo na zbiorniki ciśnieniowe
Miedź odporna na obciążenia dynamiczne (miedź beztlenowa umocniona odkształceniowo)	>0,6	120	– stosowana na modele zbiorników ciśnieniowych oraz na zbiorniki o małych wymiarach ze wzgl. na odporność na korozję
Stopy Al odporne na obciążenia dynamiczne	>0,6	80	– stosowane tylko stopy Al serii 1000 i 3000
Stopy Ti	0,2	700	– stosowane na lekkie zbiorniki ciśnieniowe ze wzgl. na wysoką granicę plastyczności i niską masę właściwą
Wysokowytrzymałe stopy Al	0,1	500	
GFRP/CFRP	0,1	500	

Z tab. 1 wynika, że duże zbiorniki wysokociśnieniowe są zawsze produkowane ze stali. Zbiorniki modeli - np. modelu maszyny parowej - są miedziane. Materiał ten jest preferowany również na zbiorniki o małych wymiarach ze względu na większą odporność na korozję.

Do przeprowadzenia doboru materiału na zajęciach laboratoryjnych wykorzystany będzie program numeryczny CES. Praktyczne przeprowadzenie doboru materiału w tym programie, na przykładzie pokazanego tutaj zbiornika ciśnieniowego, jest przedstawione w części II niniejszej instrukcji.

2.3 Podsumowanie

Zbiorniki ciśnieniowe powszechnego stosowania są już obecnie urządzeniami bezpiecznymi – ich awarie zdarzają się rzadko i są niegroźne. Poważniejsze awarie (pęknięcia zbiorników) dotyczą jedynie przypadków, gdy margines bezpieczeństwa zawęża się do minimum (rakiety, nowe konstrukcje samolotów). Ten (względny) sukces jest jednym z głównych wkładów mechaniki pękania do praktyki inżynierskiej.

Literatura:

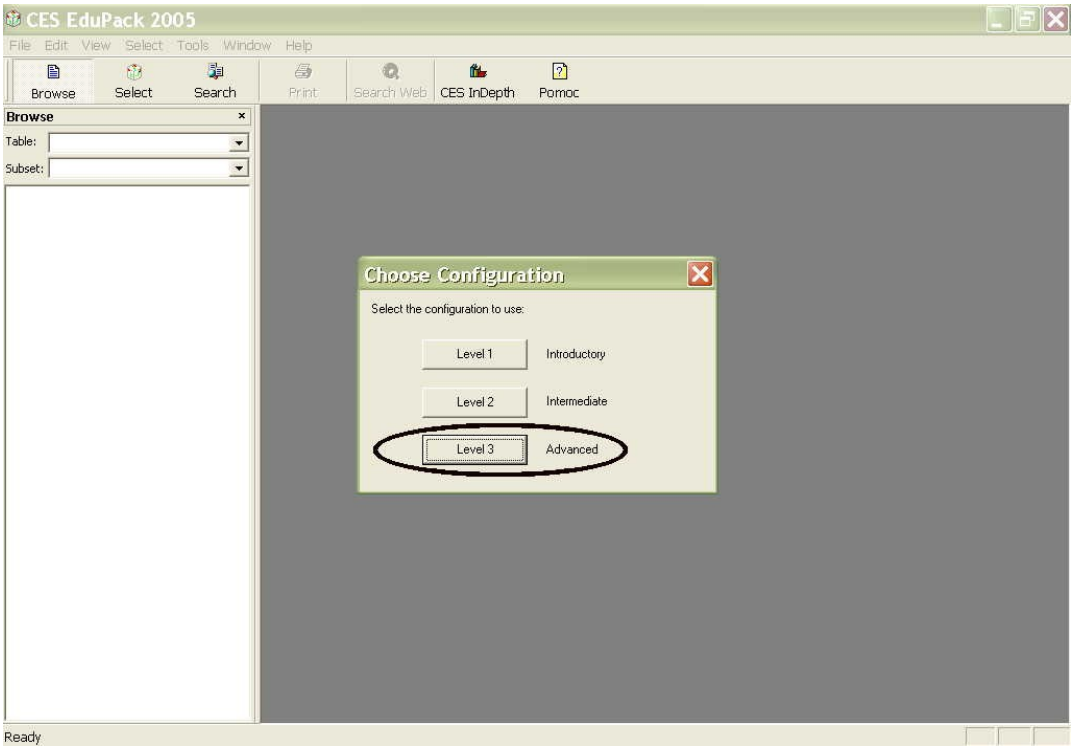
Ashby Michael F. – Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim, Warszawa 1998
Ashby Michael F. – Materials Selection in Mechanical Design, 2001
Ashby Michael F. – Materials and Shape, Acta metall. mater., 39, 6, 1025-1039, 1991

Część III

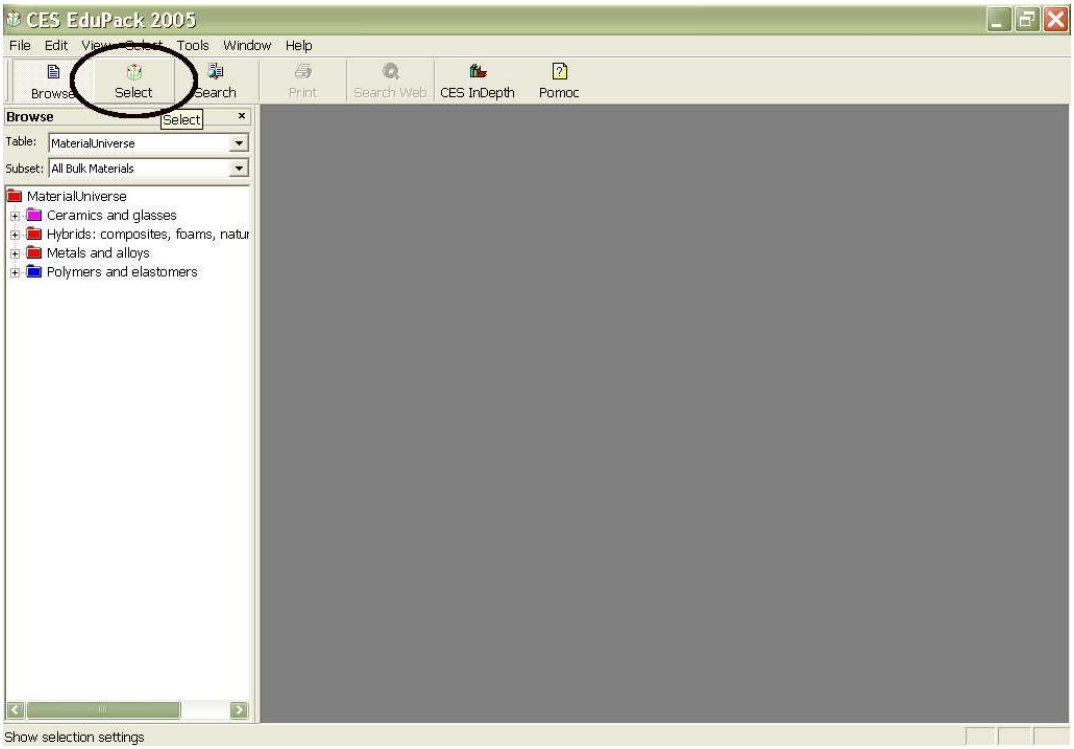
Praktyczna instrukcja użytkownika programu CES 4.5 i 5.0

na przykładzie doboru materiałów na cienkościenny zbiornik ciśnieniowy

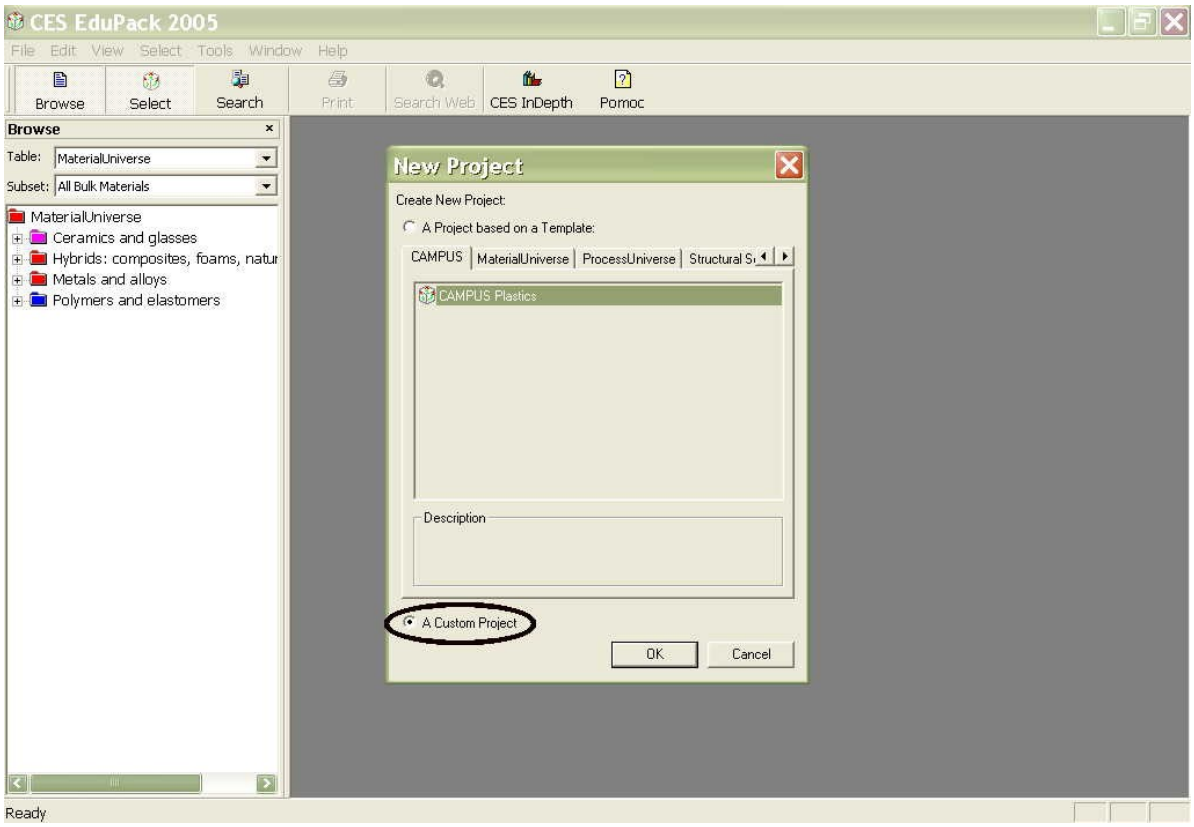
Krok 1. Wybór stopnia zaawansowania doboru materiałów (bazy danych)



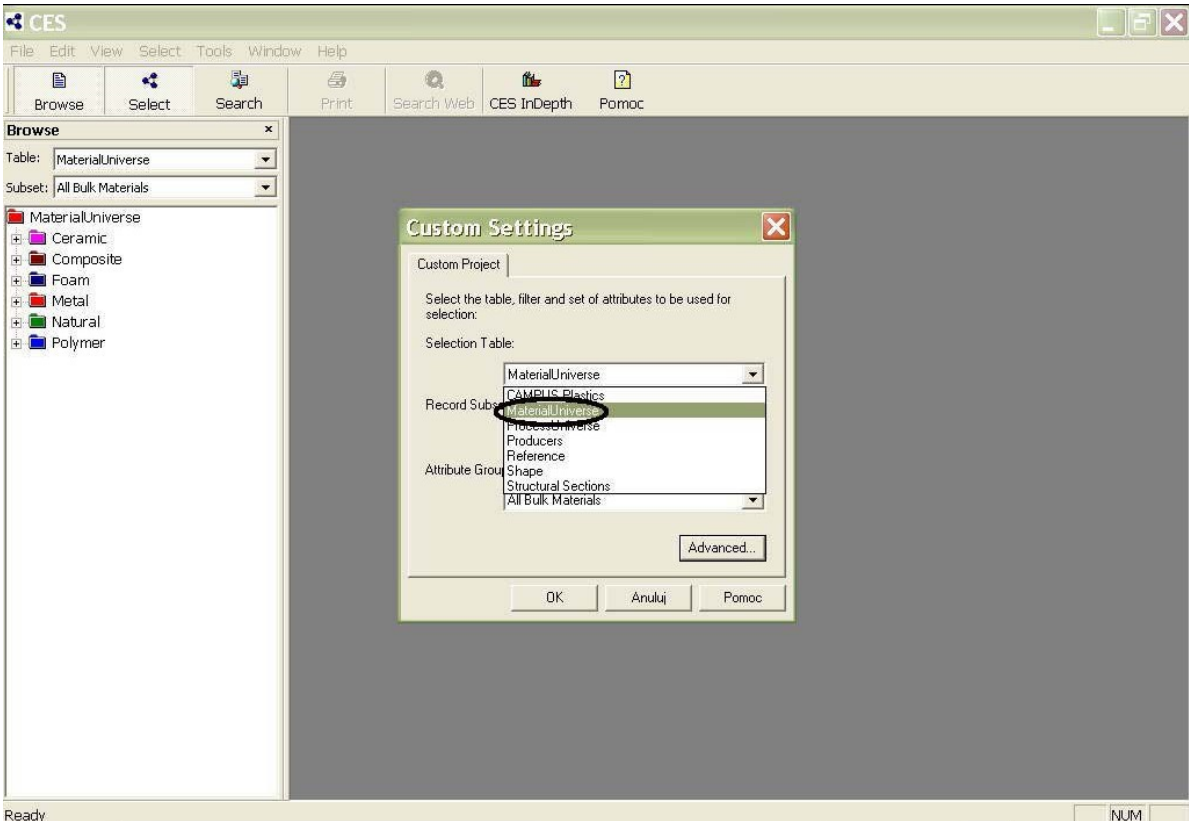
Krok 2. Wybór ustawień nowego projektu



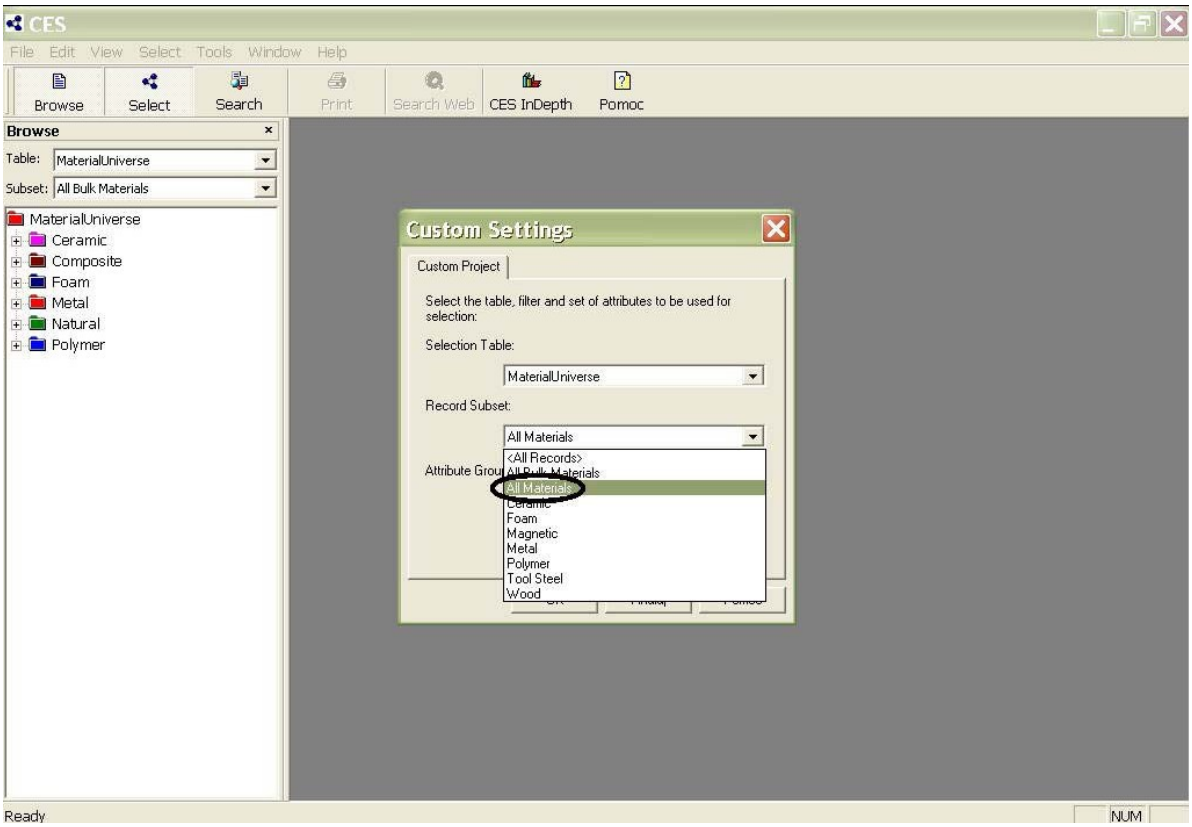
Krok 3. Wybór projektu opartego na ustawieniach użytkownika



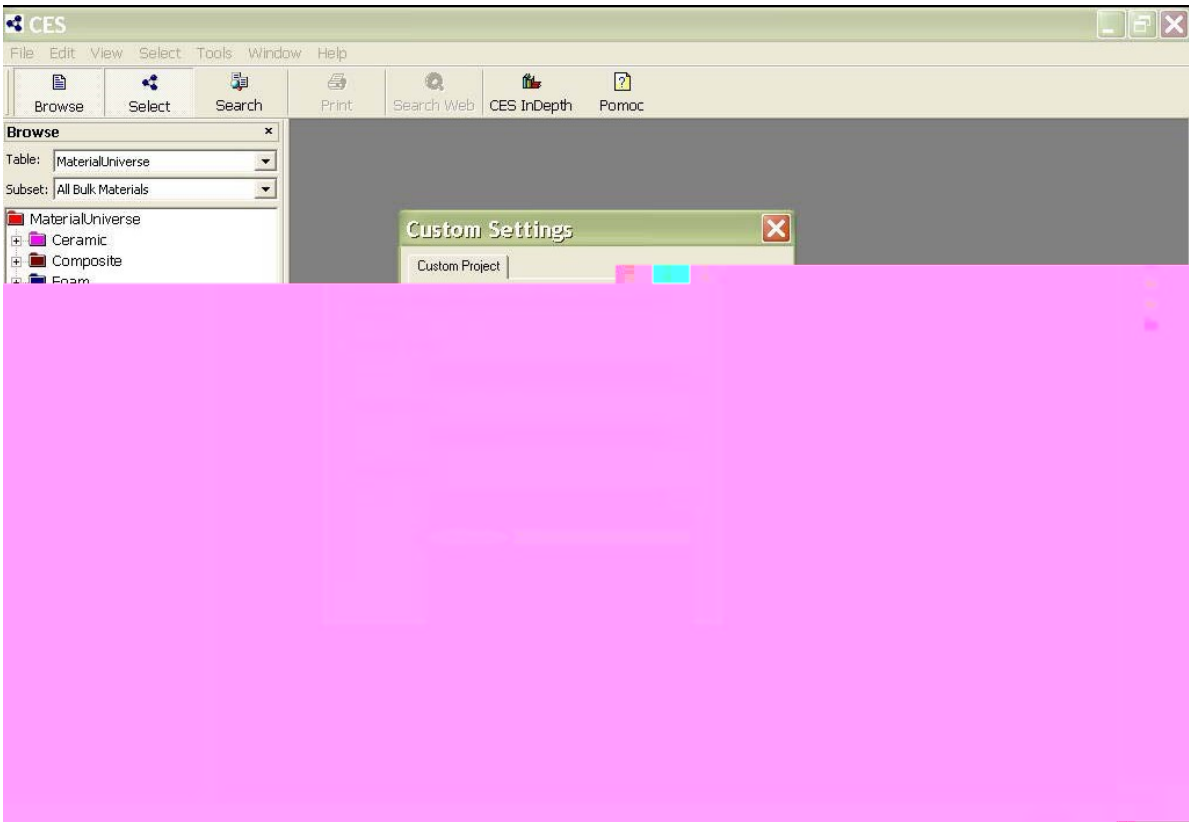
Krok 4. Wybór opcji projektu: tablica wyboru – świat materiałów



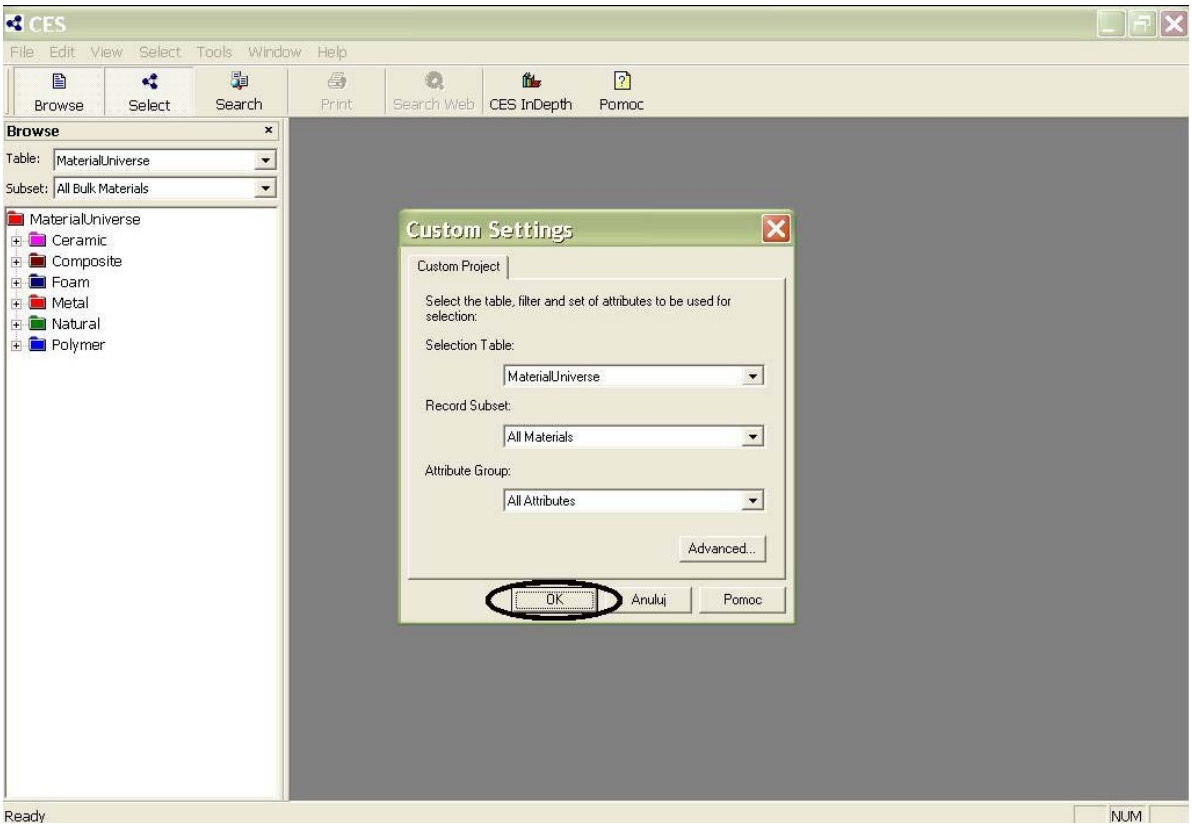
Krok 5. Wybór opcji projektu: wyznaczenie podgrupy – wszystkie materiały



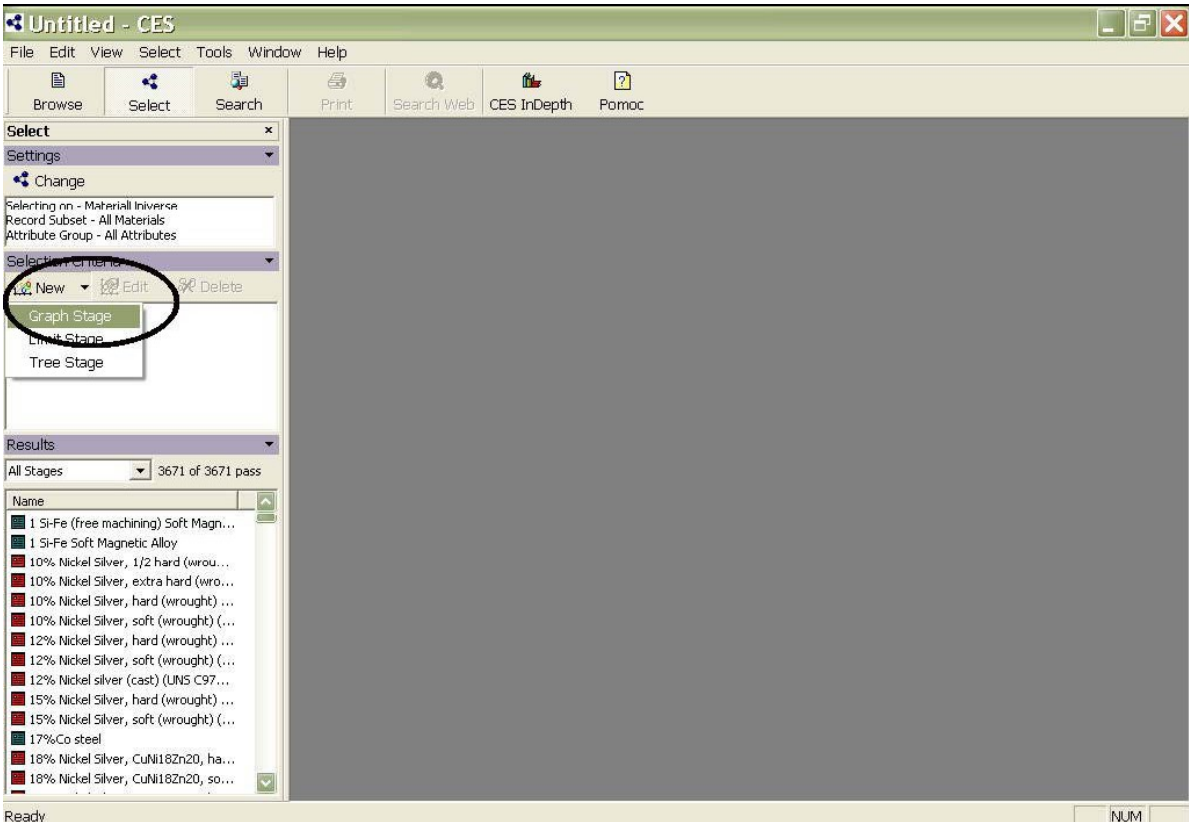
Krok 6. Wybór opcji projektu: właściwość grupy – wszystkie właściwości (nie ogranicza możliwości wyznaczenia dowolnej cechy/własności materiału, jako kryterium wyboru w dalszych etapach pracy w projekcie)



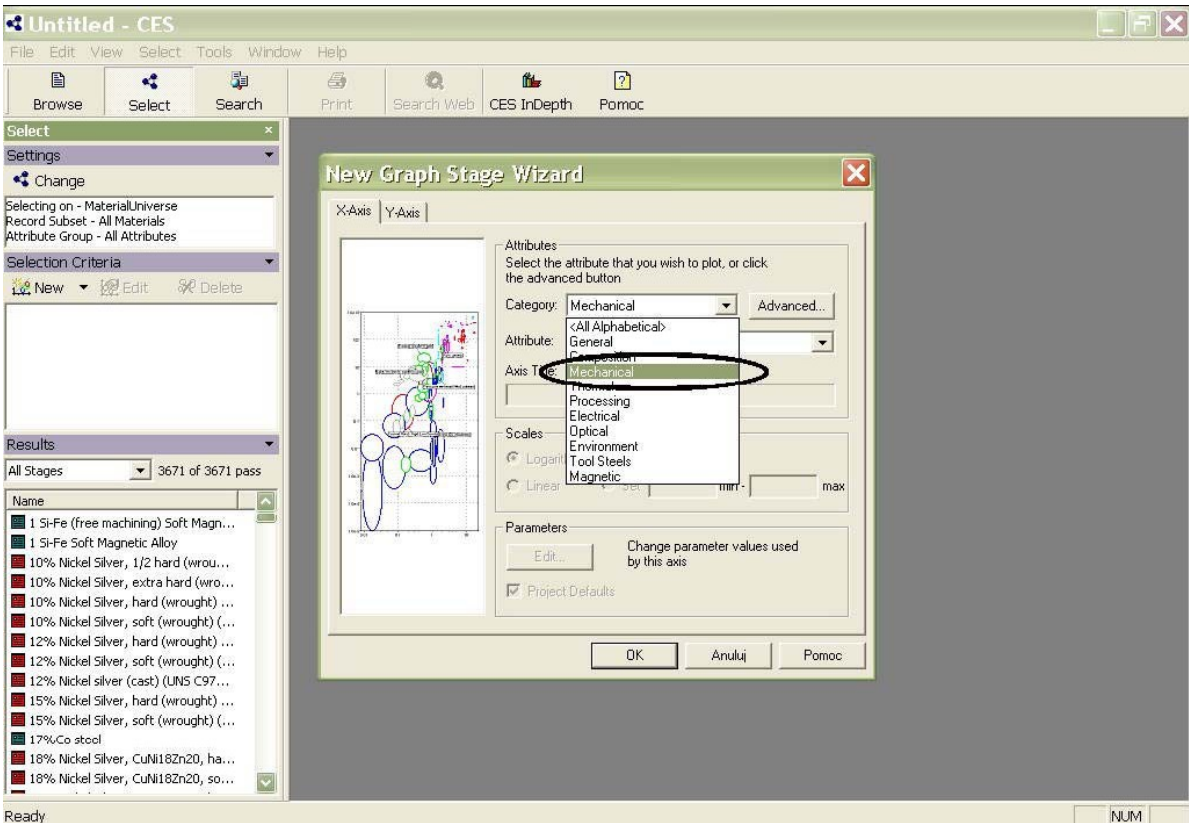
Krok 7. Zatwierdzenie wprowadzonych ustawień nowego projektu



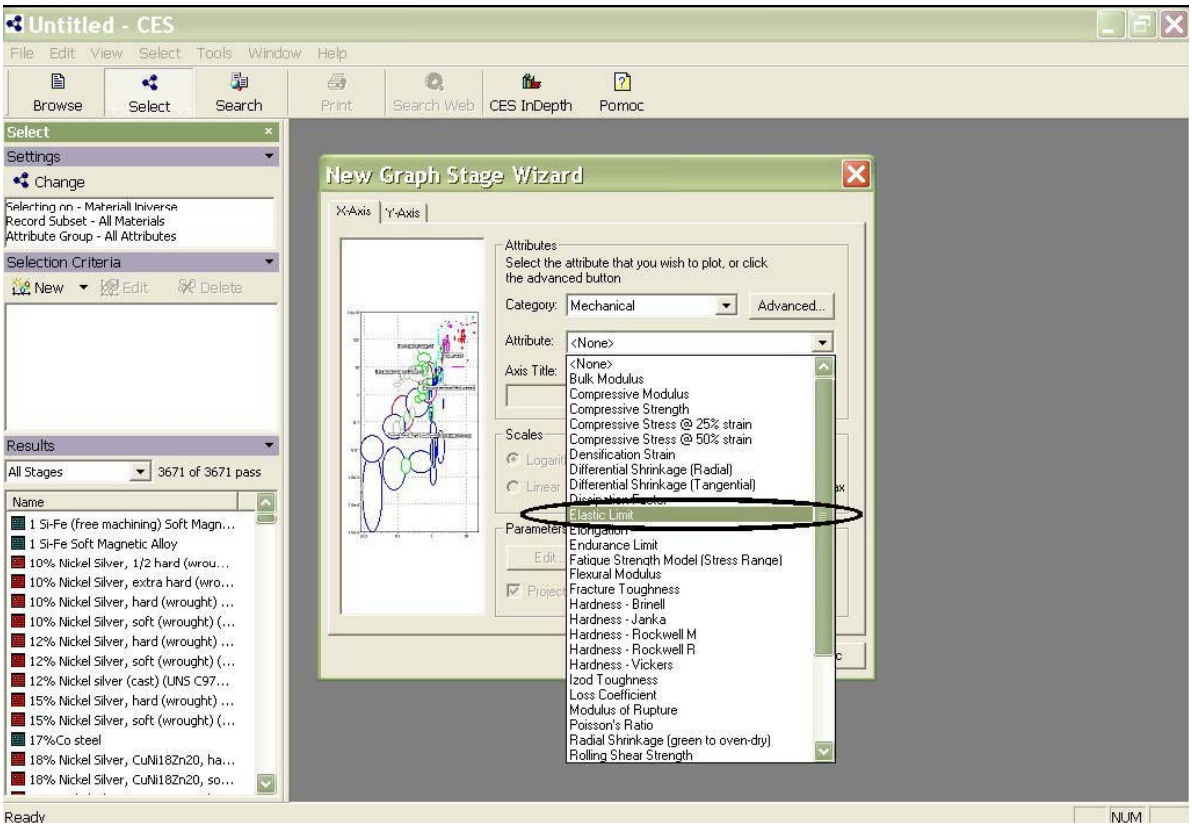
Krok 8. Wybór sposobu wprowadzania kryteriów – etap graficzny (wykres)



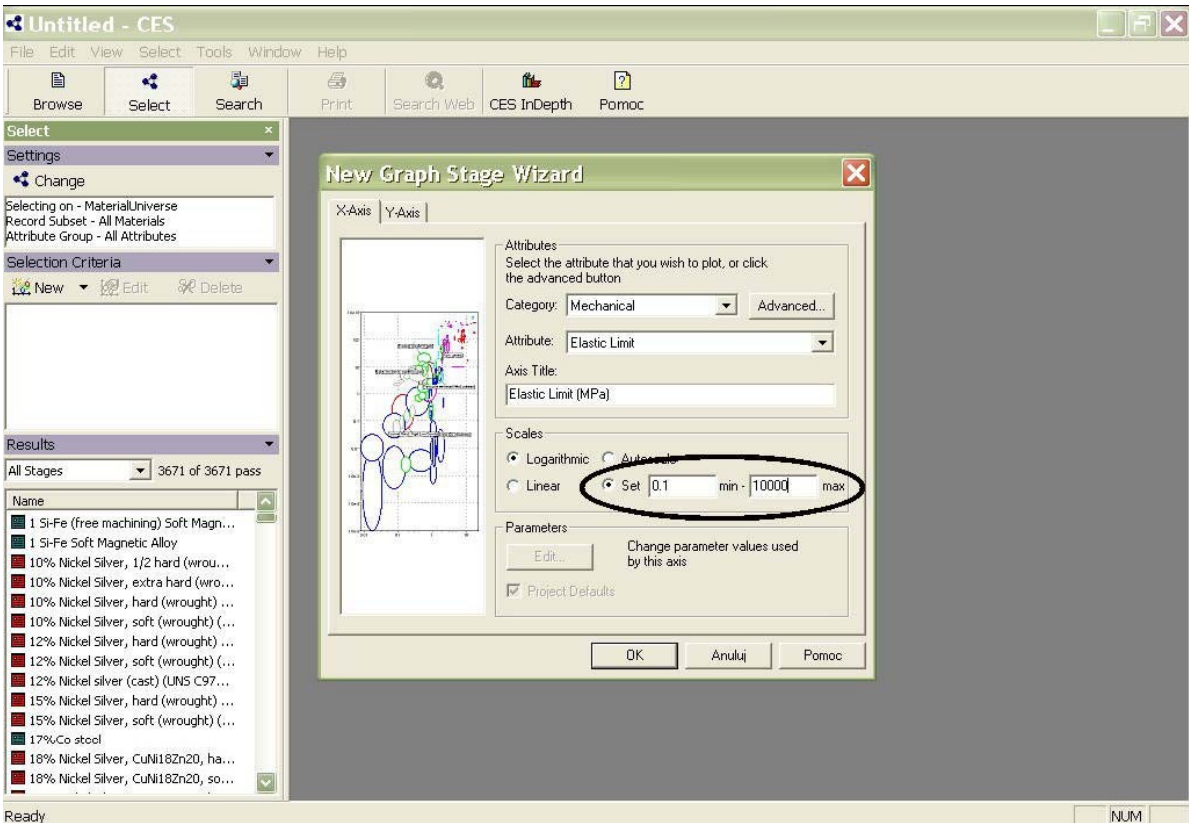
Krok 9. Opis tworzonego wykresu: oś *X*, kategoria wielkości – własności mechaniczne



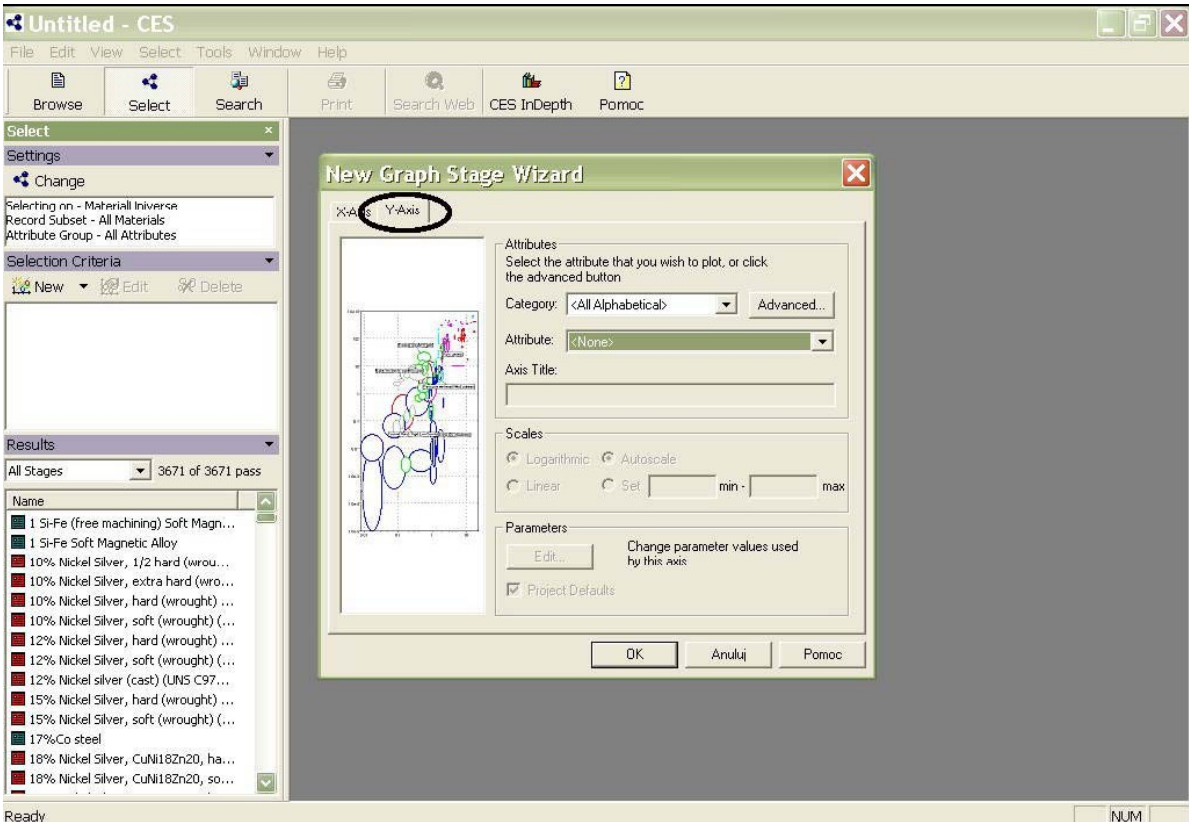
Krok 10. Opis tworzonego wykresu: oś *X*, wielkość – wytrzymałość σ_f



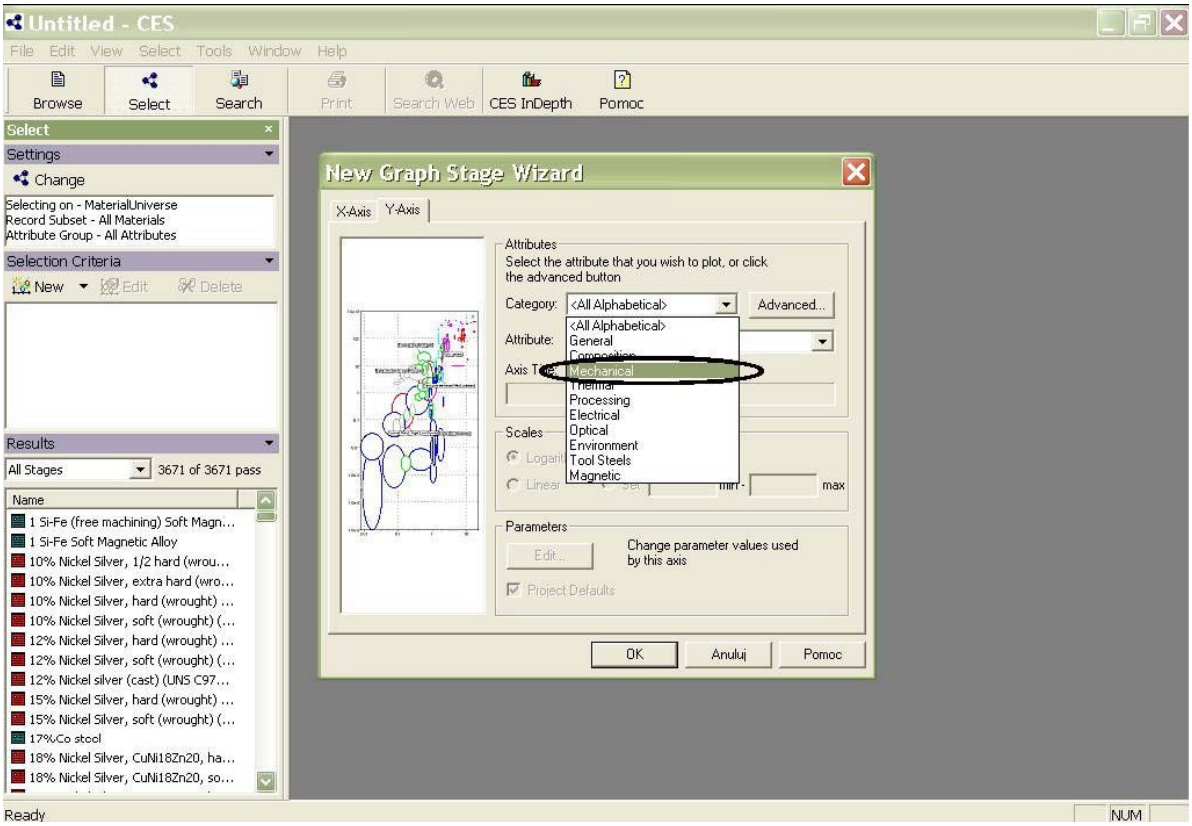
Krok 11. Opis tworzonego wykresu: oś *X* - skala i zakres osi



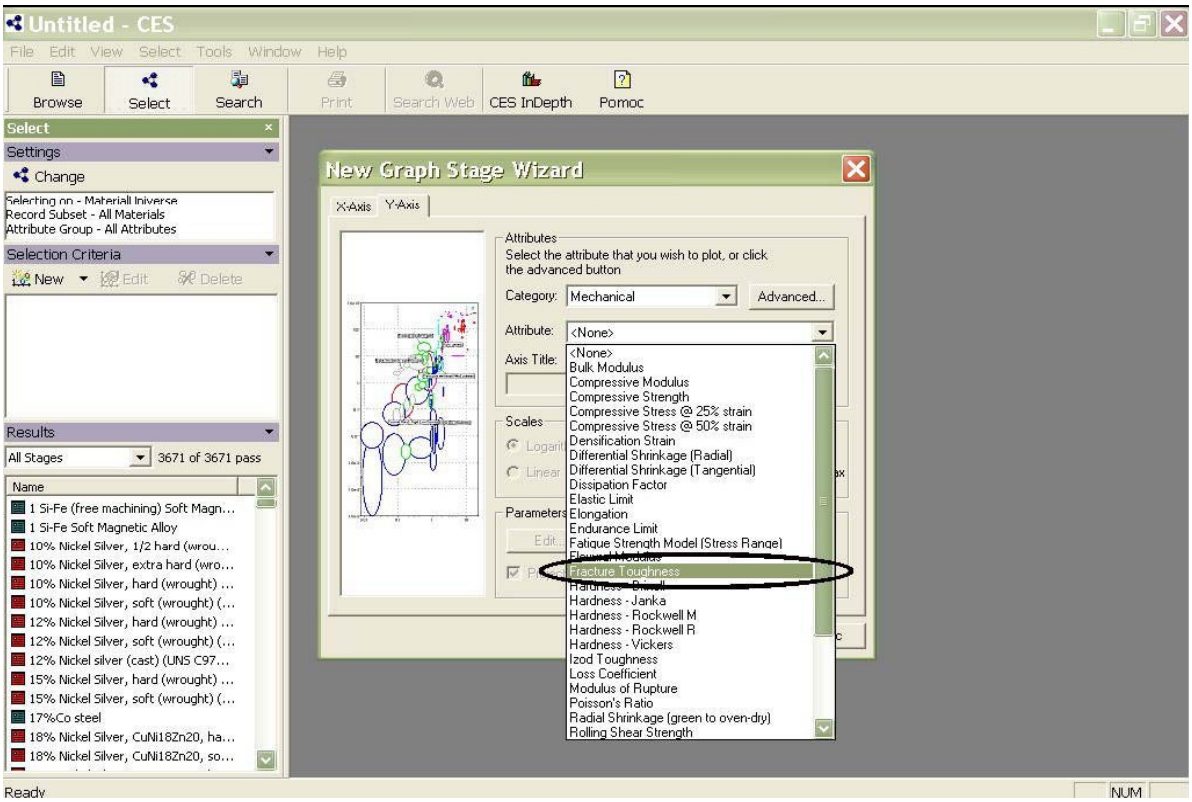
Krok 12. Opis tworzonego wykresu: oś *Y*



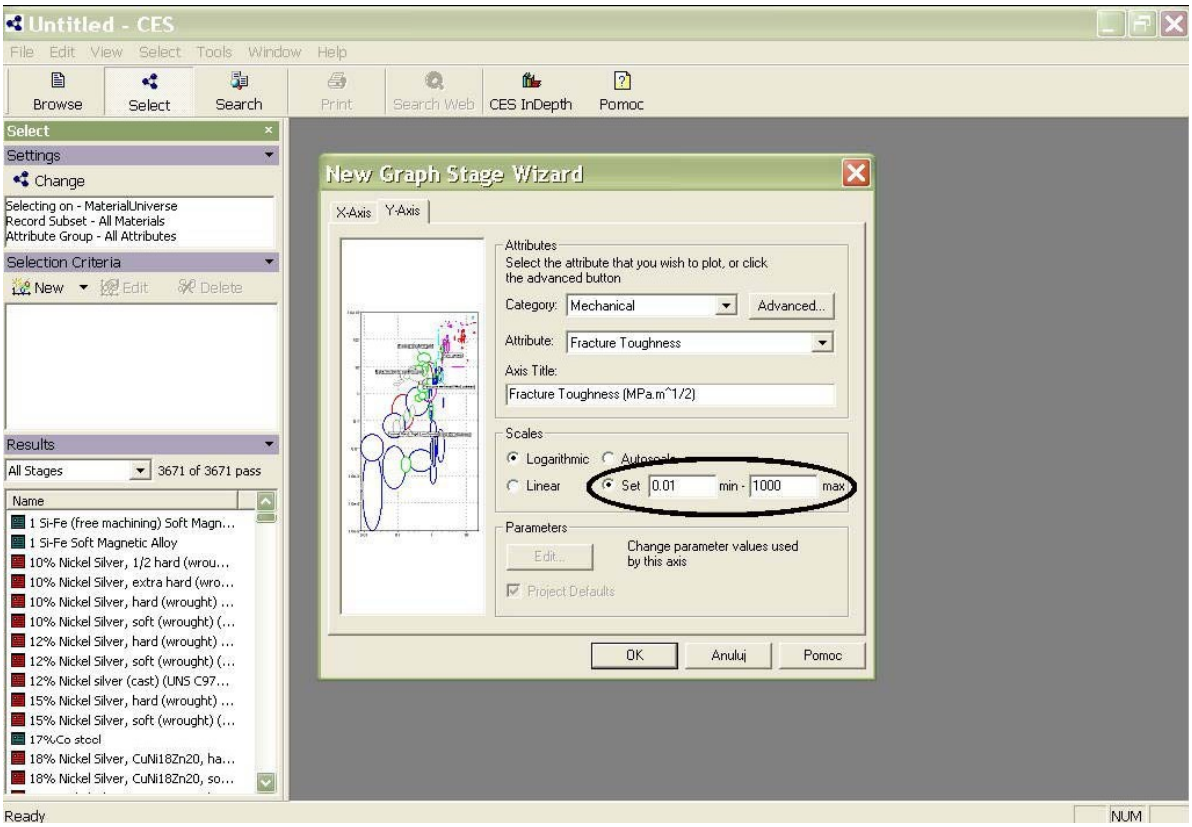
Krok 13. Opis tworzonego wykresu: oś *Y*, kategoria wielkości – własności mechaniczne



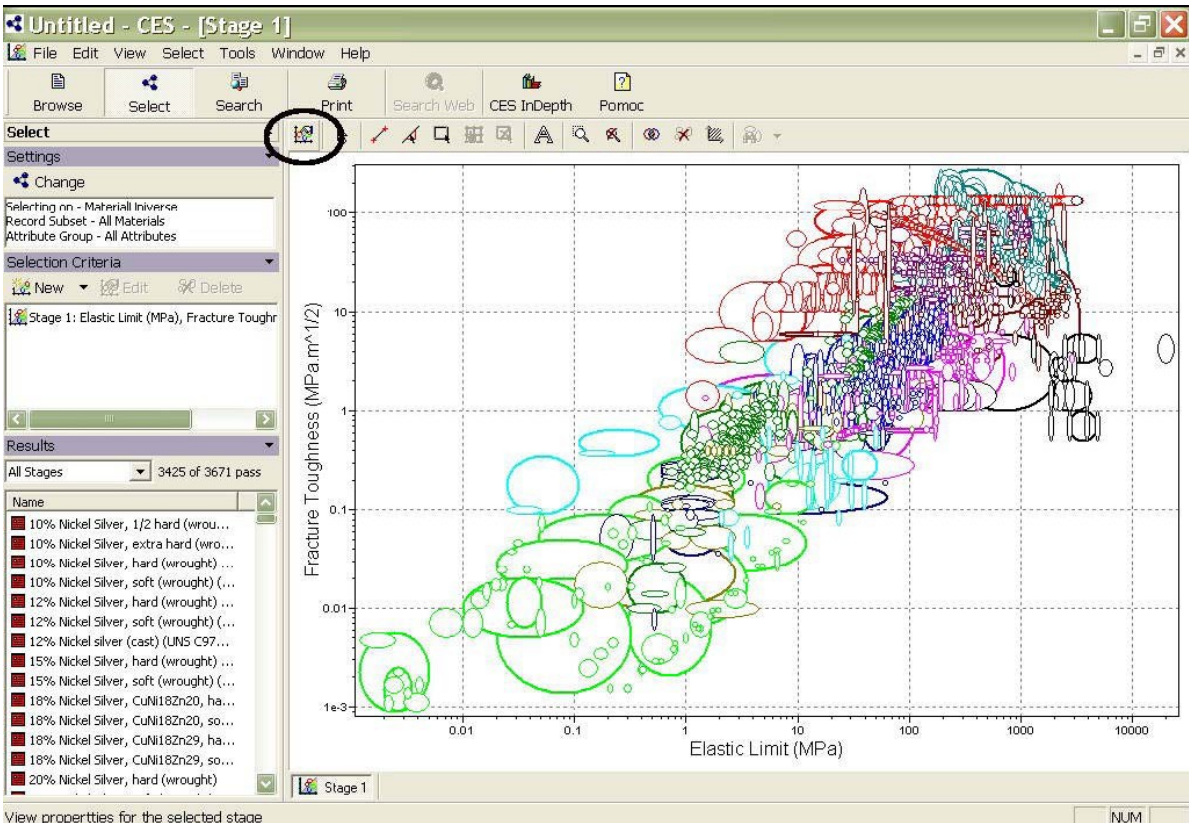
Krok 14. Opis tworzonego wykresu: oś *Y*, wielkość – współczynnik intensywności naprężeń K_{IC}



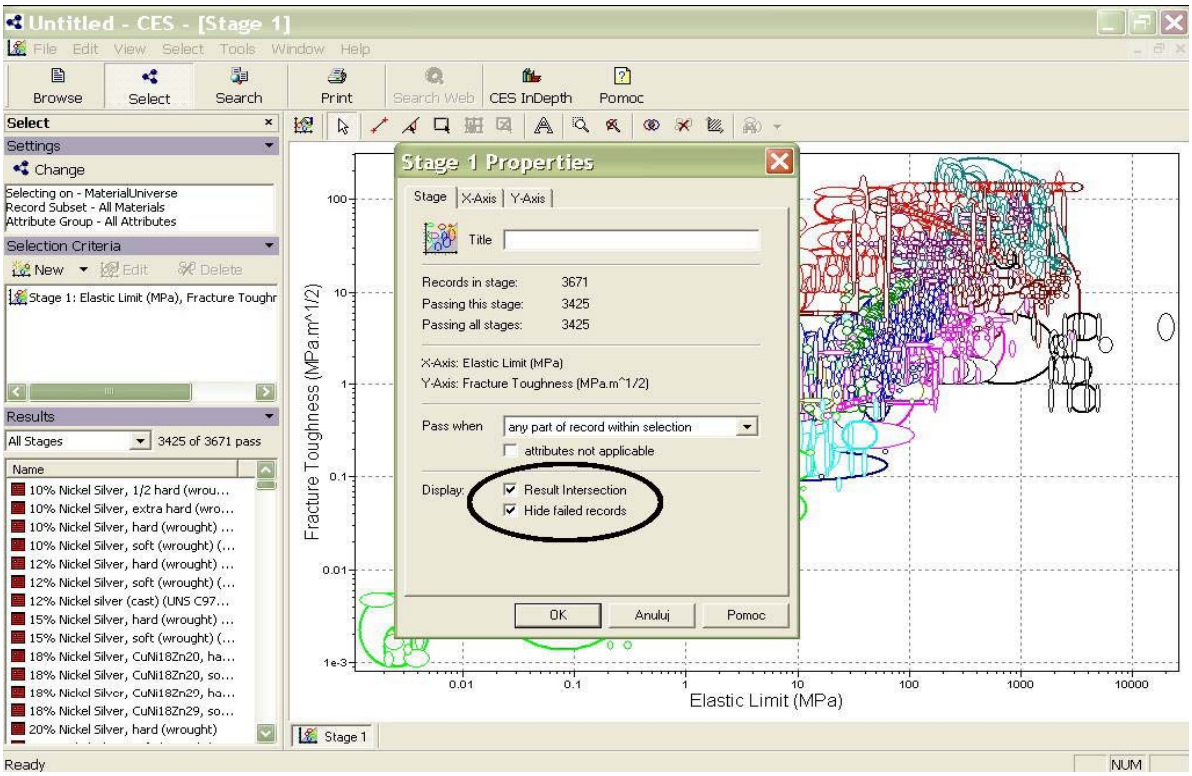
Krok 15. Opis tworzonego wykresu: oś *Y* - skala i zakres osi



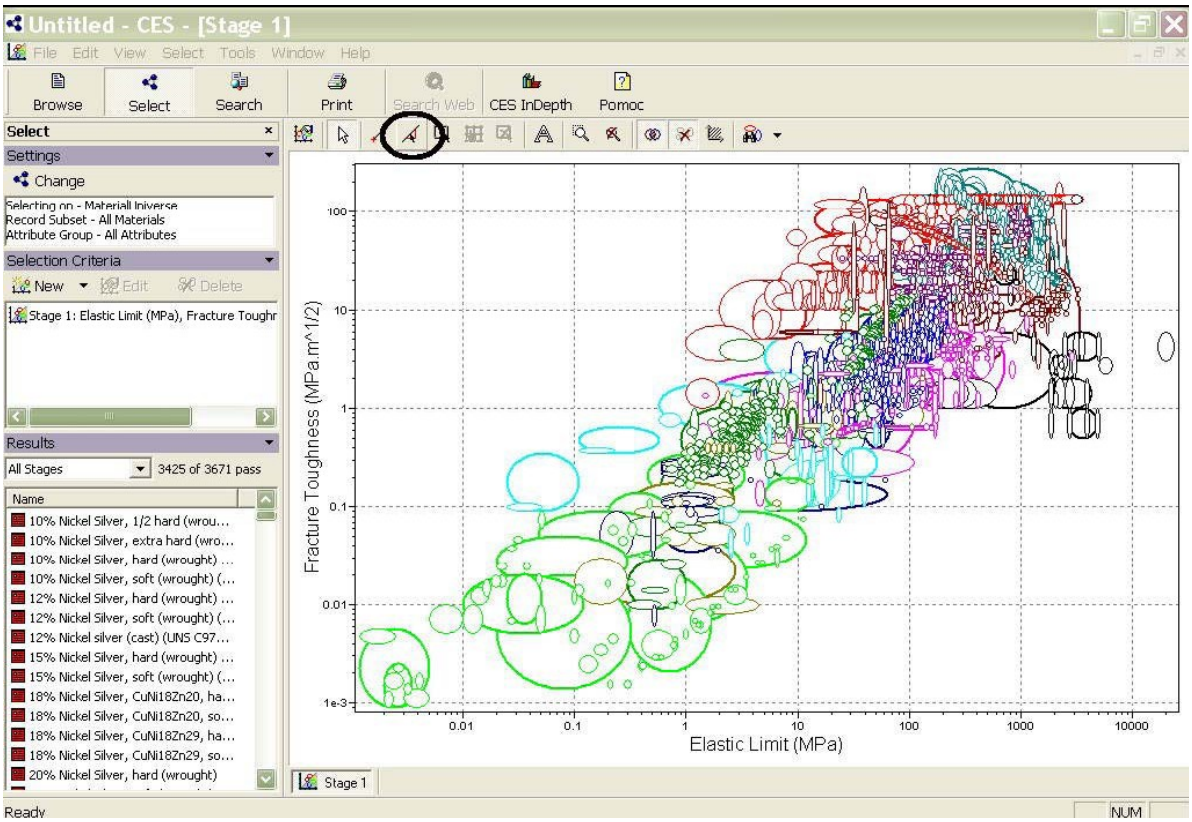
Krok 16. Wybór edycji własności etapu graficznego (wykresu)



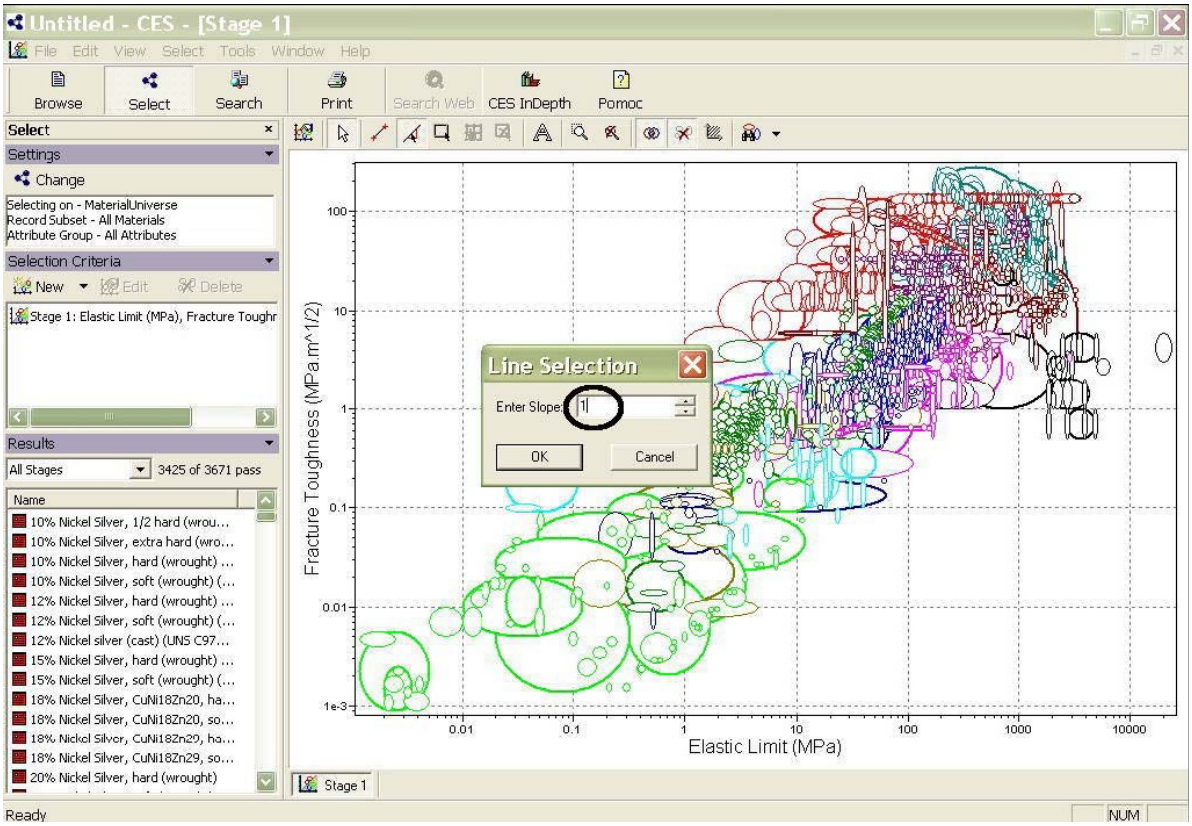
Krok 17. Edycja własności etapu graficznego: sumowanie się wyników kolejnych etapów selekcji materiałów i ukrycie na wykresie rodzin materiałów nie spełniających zadanych kryteriów



Krok 18. Wprowadzenie kryterium wyboru materiału za pomocą prostej o znanym współczynniku nachylenia



Krok 19. Wprowadzenie kryterium wyboru materiału za pomocą prostej o znanym współczynniku nachylenia a_1 (wartość liczbowa dla wskaźnika M_1)



- następnie naciskając i przytrzymując lewy klawisz myszy, znaleźć kursorem punkt na osi *Y* o współrzędnej $K_{IC} \approx 0{,}06$ *[MPa·m1/2]* (odczyt w lewym, dolnym rogu ekranu) i zwolnić klawisz myszy

- jednokrotnie kliknąć <u>w górnej części</u> obszaru wykresu, nad powstałą prostą (w ten sposób odrzuca się rodziny materiałów położone w całości poniżej prostej, maksymalizując tym samym wprowadzone kryterium uplastycznienia materiału przed wystąpieniem mikropęknięcia)

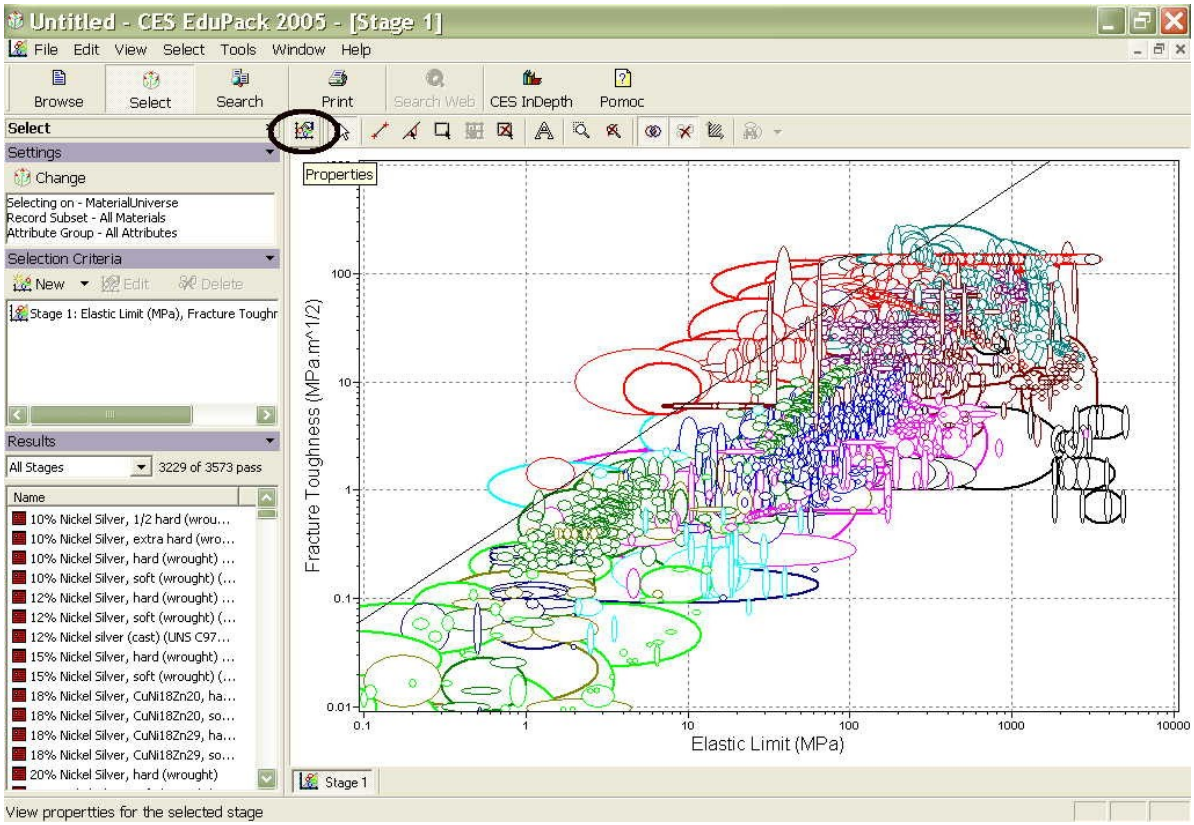
natomiast

- w przypadku błędnego kliknięcia poniżej prostej, zastosować się do kroków 19a i 19b

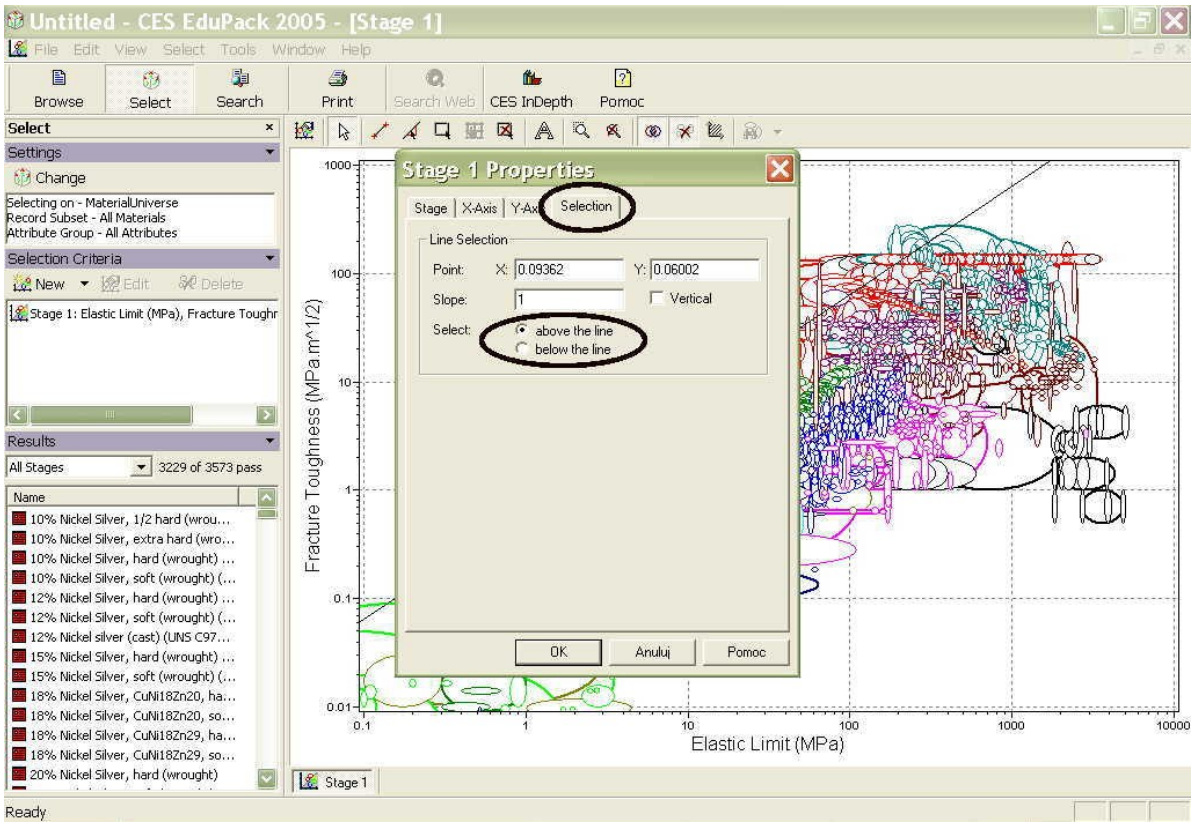
- w razie wystąpienia potrzeby usunięcia powstałej prostej, należy kliknąć na wskazaną ikonę znajdującą się na górnym pasku narzędzi

i powtórzyć kroki 18 oraz 19

Krok 19a. *Wybór edycji własności etapu graficznego (wykresu) w celu ewentualnej modyfikacji wprowadzonego już kryterium (wybór rodziny materiałów poniżej lub powyżej prostej)*



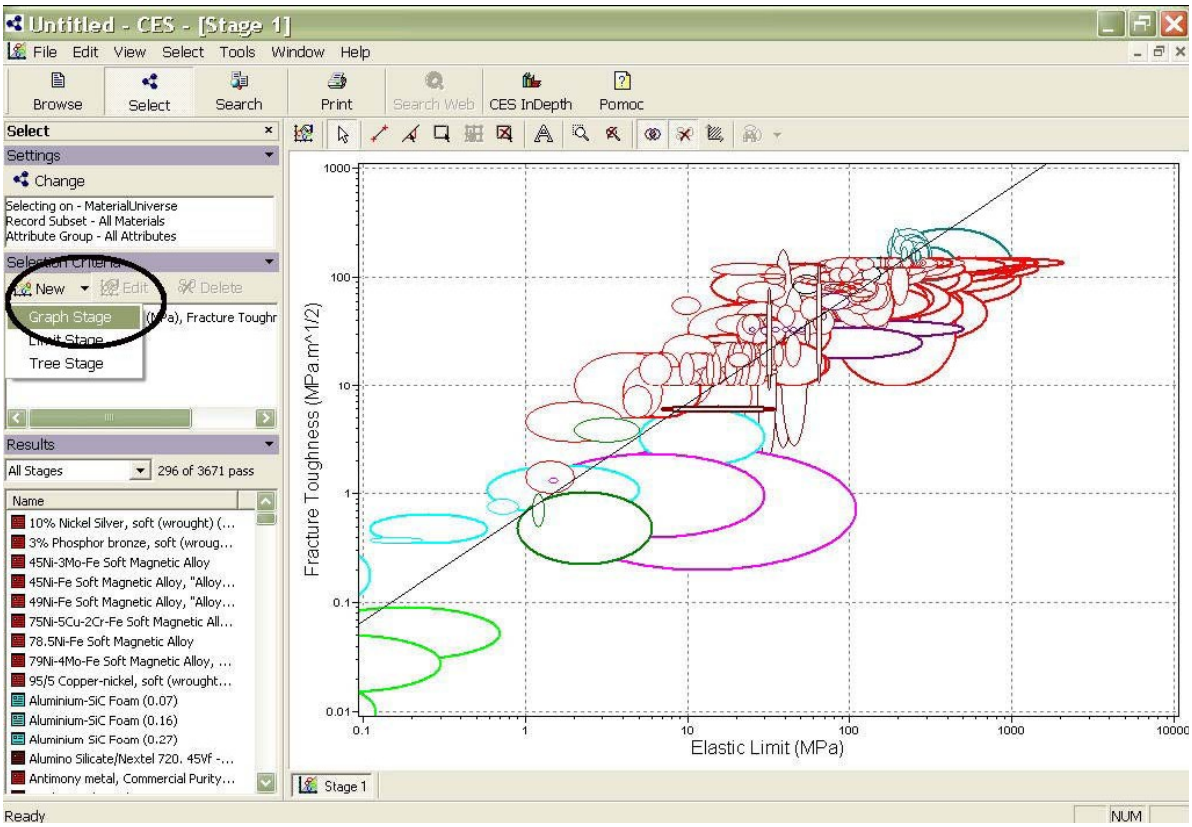
Krok 19b. *Wybór rodziny materiałów poniżej lub powyżej prostej*



- zamiast kroku 20 możliwe jest skopiowanie już istniejącego, pierwszego etapu graficznego (wykresu) w oknie selekcji kryteriów po lewej stronie ekranu (nacisnąć prawy przycisk myszy, kopiuj i następnie wklej), a dalej jego modyfikacja

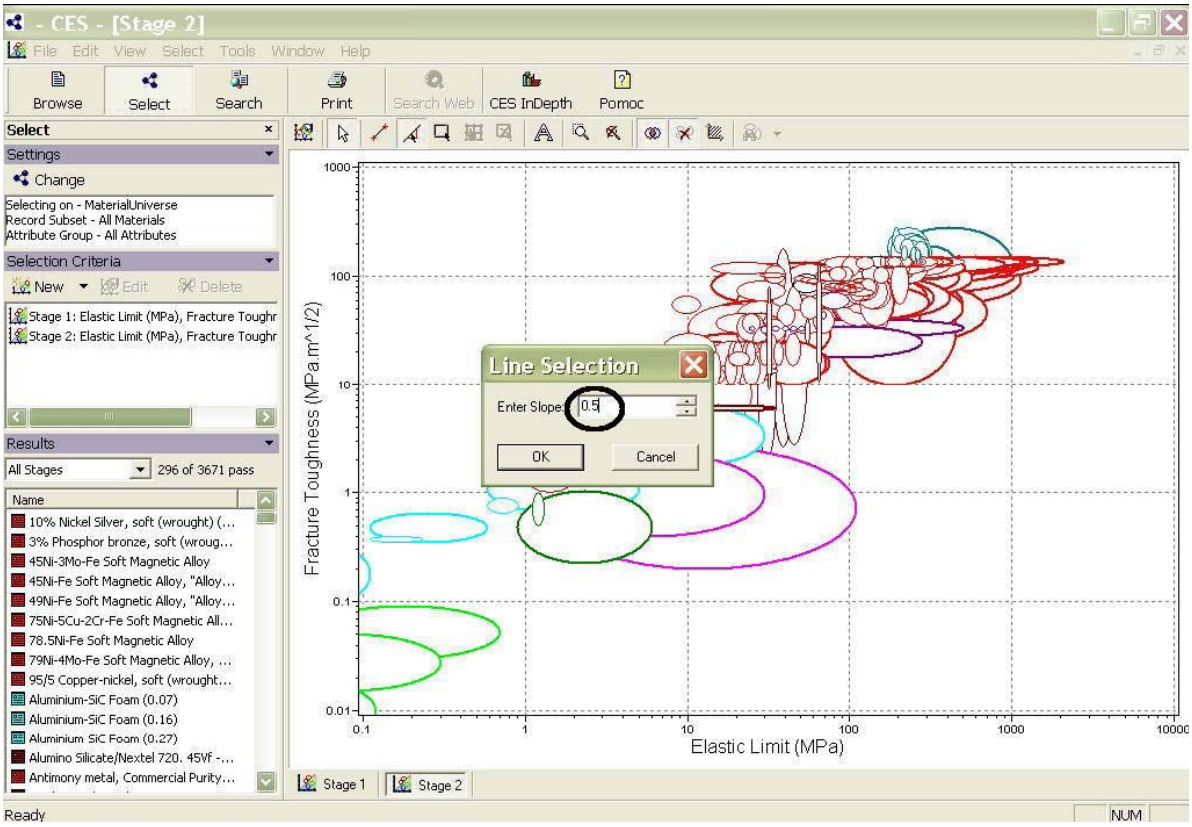
lub

Krok 20. Ponowny wybór sposobu wprowadzania kryteriów – etap graficzny (wykres) dla drugiego kryterium wyboru materiałów



- po kroku 20 należy powtórzyć kroki od 9 do 18 włącznie

Krok 21. Wprowadzenie kryterium wyboru materiału za pomocą prostej o znanym współczynniku nachylenia a_2 (wartość liczbowa dla wskaźnika M_2)



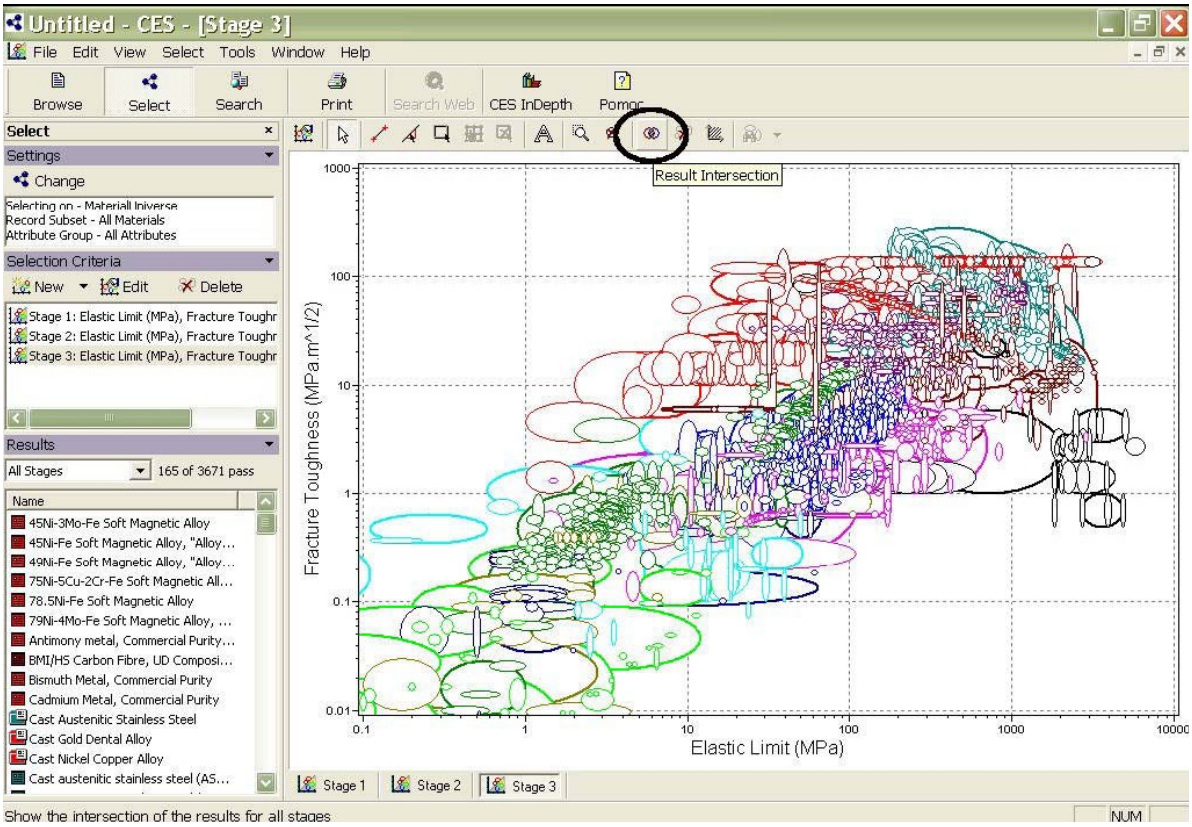
- następnie naciskając i przytrzymując lewy klawisz myszy, znaleźć kursorem punkt na osi *Y* o współrzędnej $K_{IC} \approx 3$ *[MPa·m$^{1/2}$]* (odczyt w lewym, dolnym rogu ekranu) i zwolnić klawisz myszy

- jednokrotnie kliknąć <u>w górnej części</u> obszaru wykresu, nad powstałą prostą (w ten sposób odrzuca się rodziny materiałów położone w całości poniżej prostej, maksymalizując tym samym wprowadzone kryterium stabilności mikropęknięcia)

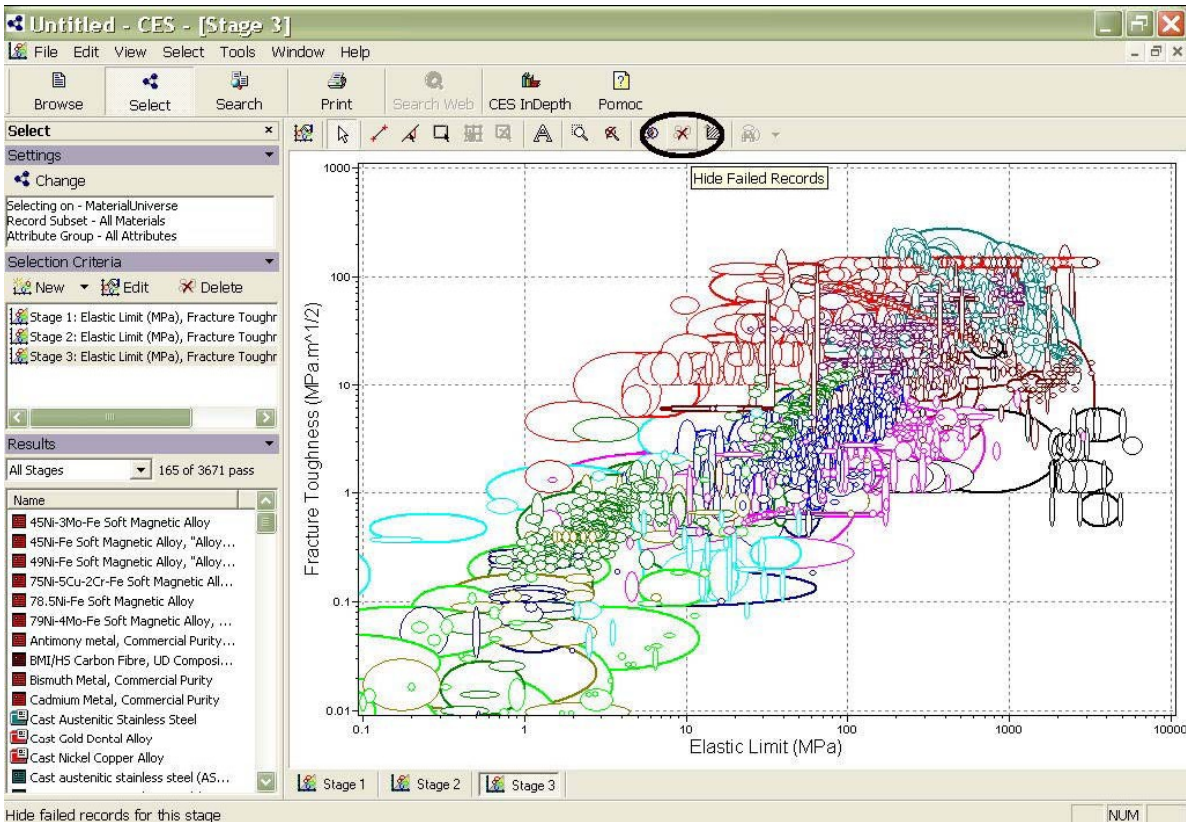
Krok 22. Powtórzyć kroki od 8 do 15 włącznie lub skopiować już istniejący, drugi etap graficzny (wykres) w celu wprowadzenia kolejnego, trzeciego kryterium doboru materiałów

Krok 23. Powtórzyć kroki 16 i 17 lub wykonać kroki 23a i 23b (realizujące tą samą funkcję, ale za pomocą ikon z górnego paska narzędzi programu)

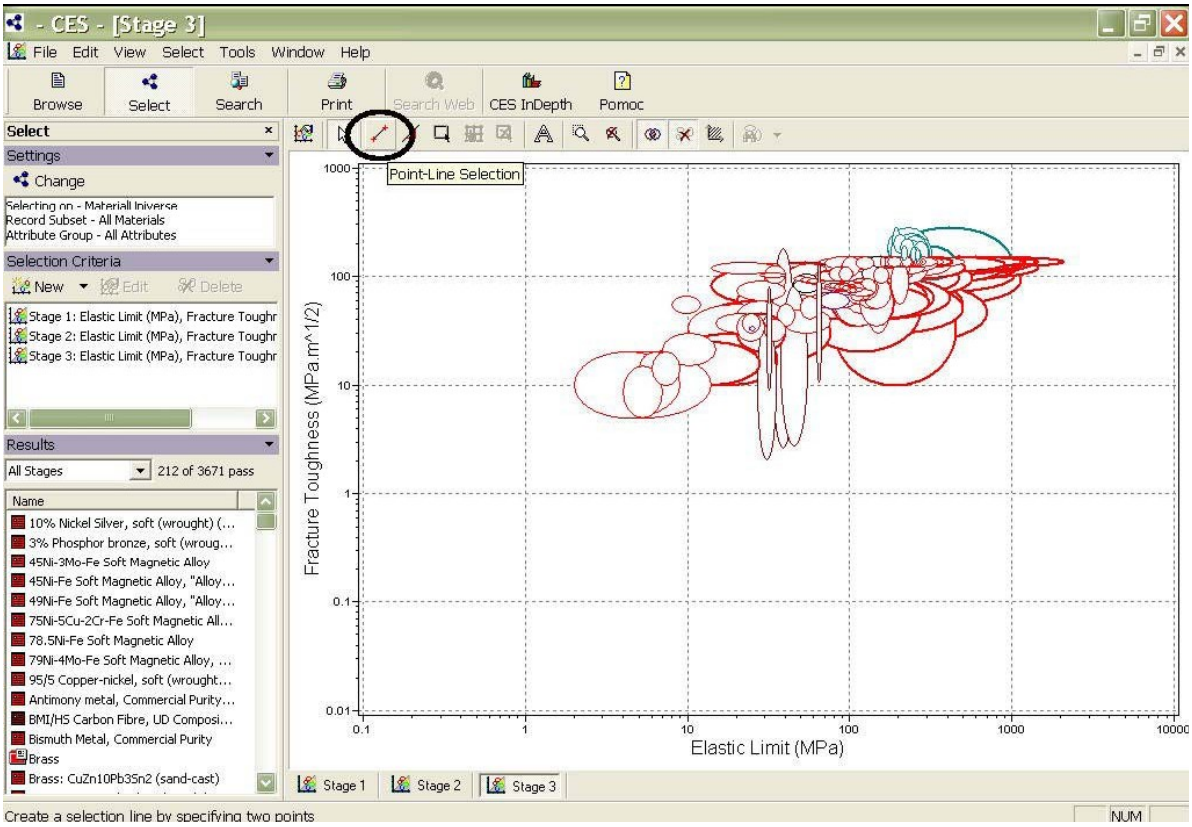
Krok 23a. *Edycja własności etapu graficznego z górnego paska narzędzi programu: sumowanie się wyników kolejnych etapów selekcji materiałów*



Krok 23b. *Edycja własności etapu graficznego z górnego paska narzędzi programu: ukrycie na wykresie rodzin materiałów nie spełniających zadanych kryteriów*



Krok 24. Wprowadzenie kryterium wyboru materiału za pomocą prostej poziomej lub pionowej - wartość liczbowa dla wskaźnika M_3

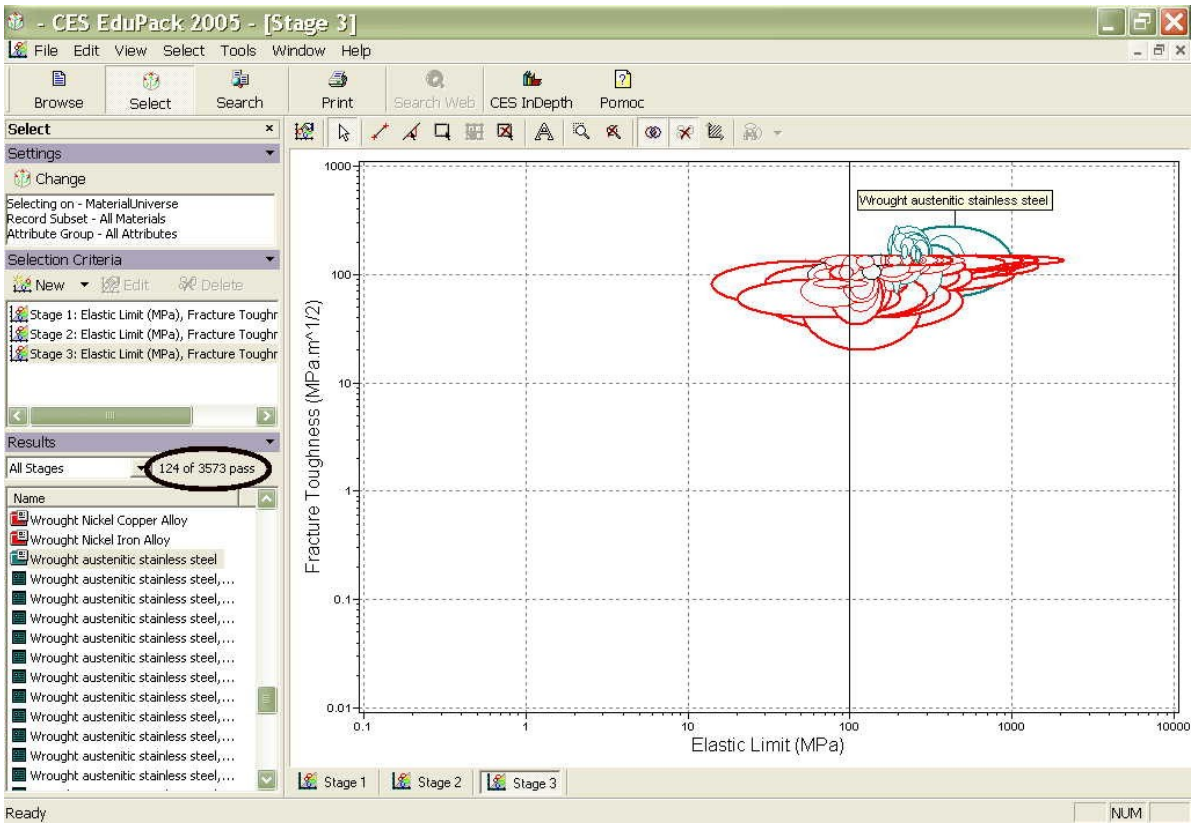


- następnie znaleźć kursorem punkt na osi *X* o współrzędnej $\sigma_f \approx 100$ *[MPa]* (odczyt w lewym, dolnym rogu ekranu), nacisnąć lewy przycisk myszy i nie zwalniając go przesunąć kursor ku górze, nanosząc w ten sposób pionową linię na wykresie

- zwolnić przycisk myszy i jednokrotnie kliknąć <u>po prawej stronie</u> prostej (wybierając tym samym rodziny materiały dla których wytrzymałość $\sigma_f > 100$ *[MPa]*, czyli maksymalizując wprowadzone klasyczne kryterium wytrzymałościowe)

Krok 25. Sumaryczny wynik dla zadanych trzech kryteriów doboru materiału

reprezentowanych wskaźnikami M_1, M_2 i M_3



- kliknięcie w rodzinę materiałów na wykresie powoduje wyświetlenie się jej nazwy

- wynikowa lista gatunków materiałów spełniających postawione w zadaniu kryteria znajduje się w dolnym, lewym oknie programu – nad listą, na pasku okna można znaleźć liczbę gatunków materiałów spełniających zadane kryteria (na tle liczby wszystkich gatunków materiałów zawartych w bazie programu)

- po dwukrotnym kliknięciu w gatunek materiału znajdujący się na liście, można odczytać wartości liczbowe jego własności (rodzina materiałów do której należy zostanie automatycznie zaznaczona na wykresie)

KONIEC ZADANIA