



Imię i nazwisko studenta: Przemysław Raczek

Nr albumu: 138112

Studia pierwszego stopnia

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Zarządzanie i inżynieria produkcji

Specjalność/profil: Inżynieria wytwarzania i napraw maszyn

PROJEKT DYPLOMOWY INŻYNIERSKI

Tytuł pracy w języku polskim:

Opracowanie modeli statystycznych skłonności stali superdupleks do niszczenia w syntetycznej wodzie morskiej

Tytuł pracy w języku angielskim:

Elaboration considered statistical models of propensity superduplex steel to hydrogen degradation in synthetic sea water

Potwierdzenie przyjęcia pracy	
Opiekun pracy	Kierownik Katedry/Zakładu

Data oddania pracy do dziekanatu:



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ MECHANICZNY



OŚWIADCZENIE

Imię i nazwisko: Przemysław Raczko
Data i miejsce urodzenia: 04.05.1992, Gdynia
Nr albumu: 138112
Wydział: Wydział Mechaniczny
Kierunek: zarządzanie i inżynieria produkcji
Poziom studiów: I stopnia - inżynierskie
Forma studiów: stacjonarne

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę / nie wyrażam zgody* na korzystanie z mojej pracy dyplomowej zatytułowanej: „**Opracowanie modeli statystycznych skłonności stali superdupleks do niszczenia w syntetycznej wodzie morskiej**” do celów naukowych lub dydaktycznych.¹

Gdańsk, dnia

.....
podpis studenta

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),² a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana praca dyplomowa została opracowana przeze mnie samodzielnie.

Niniejsza(y) praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem tytułu zawodowego.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. pracy dyplomowej, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy dyplomowej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia

.....
podpis studenta

Upoważniam Politechnikę Gdańską do umieszczenia ww. pracy dyplomowej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczeniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia

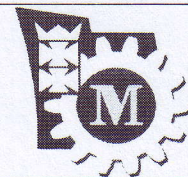
.....
podpis studenta

*) niepotrzebne skreślić

-
1. Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.
 2. Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym:
Art. 214 ustęp 4. W razie podejrzenia popełnienia przez studenta czynu podlegającego na przypisaniu sobie autorstwa istotnego fragmentu lub innych elementów cudzego utworu rektor niezwłocznie poleca przeprowadzenie postępowania wyjaśniającego.
Art. 214 ustęp 6. Jeżeli w wyniku postępowania wyjaśniającego zebrany materiał potwierdza popełnienie czynu, o którym mowa w ust. 4, rektor wstrzymuje postępowanie o nadanie tytułu zawodowego do czasu wydania orzeczenia przez komisję dyscyplinarną oraz składa zawiadomienie o popełnieniu przestępstwa.



**POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY**



Imię i nazwisko studenta: Przemysław Raczko

Nr albumu: 138112

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Zarządzanie i Inżynieria Produkcji

Specjalność: Inżynieria Wytwarzania i Napraw Maszyn

Katedra: Katedra Inżynierii Materiałowej i Spawania; Zakład Inżynierii Spajania

PROJEKT DYPLOMOWY INŻYNIERSKI

Temat pracy: **Opracowanie modeli statystycznych skłonności stali superdupleks do niszczenia w syntetycznej wodzie morskiej**

Zakres pracy:

1. Opracowanie literaturowe na temat niszczenia metali
2. Opracowanie literaturowe na temat metod regresji
3. Zgromadzenie i przygotowanie danych do analiz statystycznych
4. Opracowanie planu analiz statystycznych
5. Realizacja analiz statystycznych
6. Opracowanie i zweryfikowanie wyników analiz statystycznych
7. Sformułowanie wniosków

Potwierdzenie przyjęcia pracy:

Opiekun pracy:

dr inż. Dariusz Fydrych

Kierownik Katedry/Zakładu:

KIEROWNIK ZAKŁADU
INŻYNIERII SPAJANIA

dr hab. inż. Jerzy Łobanowski, prof. nadzw. PG

Gdańsk, 17.11.2014

Streszczenie

Praca dyplomowa dotyczy analizy statystycznej metodą regresji wielorakiej oraz logistycznej wyników badań rozciągania pod stałym obciążeniem (Constant Load) próbek ze stali superdupleks w otoczeniu sprzyjającym rozwojowi niszczenia wodorowego. Dodatkowo próbki były spawane metodą FCAW (energia liniowa spawania 2,13 kJ/cm) oraz SAW (energia liniowa spawania 0,98 kJ/cm). Podczas wykonywanych analiz regresji wielorakiej, szczególna uwaga zwracana była na wpływ obciążenia, siły zastosowanej, energii liniowej oraz umiejscowienia karbu na czas do zerwania próbki. Z kolei analiza logistyczna miała na celu ukazanie oddziaływania tych samych czynników na wystąpienie pęknięcia. Podsumowanie oraz sformułowanie wniosków na temat przedstawiony w pracy było efektem utworzenia wielu modeli statystycznych w programie STATISTICA oraz ich interpretacji z różnych punktów widzenia.

Abstract

The diploma thesis concerns statistical analysis by multiple and logistic regression results of constant load examination. Studies on samples of superduplex steel in the conducive environment for hydrogen degradation development were carried. In addition, samples were welded by FCAW (heat input in welding 2,13 kJ/cm) and by SAW method (heat input in welding 0,98 kJ/cm). During performance analysis by multiple regression, special attention was given for impact of load, applied force, heat input in welding and location of notch on time to break sample. An logistic analysis was performed to show influence of the same factors on the occurrence of crack. Summary and conclusions on topic presented in diploma thesis were effect of creating a large amount of statistical models in STATISTICA program and interpretation them from many points of view.

SPIS TREŚCI

I CZĘŚĆ TEORETYCZNA	8
1. WSTĘP.....	8
2. SPAWANIE	9
2.1. Omówienie terminu spawania	9
2.2. Wybrane metody spawania	10
2.2.1. Spawanie drutem proszkowym w osłonie gazów ochronnych (FCAW)	10
2.2.2. Spawanie automatyczne łukiem krytym pod topnikiem (SAW)	11
2.3. Parametry spawania	11
3. SPAWALNOŚĆ	12
3.1. Definicje spawalności	12
3.2. Klasyfikacja spawalności stali	13
4. STALE DUPLEKS I SUPERDUPLEKS	14
4.1. Charakterystyka stali dupleks	14
4.2. Spawalność stali dupleks	15
4.3. Spawalność stali superdupleks	15
5. PĘKNIĘCIA W ZŁĄCZACH	16
5.1. Pęknięcia technologiczne	16
5.2. Pęknięcia eksploatacyjne	16
6. ODDZIAŁYWANIE WODORU NA METALE	17
6.1. Charakterystyka wodoru	17
6.2. Niszczenie wodorowe	17
6.3. Podział kruchości wodorowej	18
6.4. Miary niszczenia wodorowego	19
7. PRÓBA PRZY STAŁYM OBCIĄŻENIU	19
7.1. Idea próby	19
7.2. Środowisko badań	20
7.3. Próbki	20
8. ANALIZA REGRESJI	21
8.1. Regresja prosta	21
8.2. Regresja wieloraka	21
8.3. Regresja logistyczna	22
8.4. Metoda najmniejszych kwadratów	22
8.5. Ocena jakości równania	23
8.6. Istotność statystyczna	24
9. PROGRAM STATISTICA	25
10. PODSUMOWANIE CZĘŚCI TEORETYCZNEJ	26

II BADANIA WŁASNE	27
11. CEL I ZAKRES PRACY	27
12. PRZEPROWADZONE BADANIA.....	28
12.1.Stanowisko do badań	28
12.2.Przygotowane próbki	29
12.3.Przebieg badań.....	30
12.4.Tabela wyników	31
13. ANALIZA MODELI DLA CZYNNIKÓW ILOŚCIOWYCH.....	32
13.1.Czas do zerwania względem obciążenia (model I)	35
13.2.Czas do zerwania względem obciążenia – skorygowany (model II)	41
13.3.Czas do zerwania względem siły zastosowanej (model III)	45
14. ANALIZA MODELI DLA CZYNNIKÓW ILOŚCIOWYCH ORAZ OBSZARÓW WYSTĘPOWANIA PĘKNIĘĆ	48
14.1.Czas do zerwania względem obciążenia i obszaru D1 (model IV)	49
14.2.Czas do zerwania względem siły zastosowanej, obszaru D1 oraz energii liniowej (model V)	53
15. ANALIZA MODELI METODĄ LOGISTYCZNĄ DLA CZYNNIKÓW ILOŚCIOWYCH	59
15.1.Pęknięcie względem obciążenia (model VI).....	59
15.2.Pęknięcie względem siły zastosowanej (model VII)	64
16. ANALIZA MODELI METODĄ LOGISTYCZNĄ DLA CZYNNIKÓW ILOŚCIOWYCH ORAZ OBSZARÓW WYSTĘPOWANIA PĘKNIĘĆ	69
16.1.Pęknięcie względem obciążenia i obszaru D1 (model VIII)	69
16.2.Pęknięcie względem siły zastosowanej i obszaru D1 (model IX).....	75
16.3.Pęknięcie względem siły zastosowanej i obszaru D2 (model X).....	80
17. ZESTAWIENIE TABELARYCZNE OPRACOWANYCH MODELI	85
18. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	87

Wykaz ważniejszych oznaczeń

SWC – strefa wpływu ciepła

CEV – współczynnik węgla

Tt – temperatura topnienia

β_i – i-ty współczynnik regresji

ε – składnik losowy

MNK – metoda najmniejszych kwadratów

e – liczba Eulera

u – unit, jednostka masy atomowej

R – współczynnik korelacji linowej Pearsona

R^2 – współczynnik determinacji

R^2_{popr} – skorygowany współczynnik determinacji

SW – test Shapiro – Wilka

Ob – obciążenie zastosowane [%]

Fz - siła zastosowana [kN]

EI – energia liniowa spawania [kJ/cm]

tz – czas do zerwania próbki [h]

D1 – obszar strefy wpływu ciepła

D2 – obszar spoiny

I **Część teoretyczna**

1. Wstęp

Początki historii spawalnictwa sięgają schyłku XIX wieku, a konkretnie roku 1885, kiedy opatentowane zostało spawanie łukowe elektrodą węglową. Od tamtego pamiętnego wydarzenia, technologie spawalnicze z biegiem czasu rozwijały się prężnie, co przekładało się na fakt, że zastosowanie znajdowały w coraz większej ilości gałęzi przemysłu.

Obecnie, łączenie materiałów za pomocą spawania to jedna z metod, które wykorzystuje się najczęściej. Przytoczona wcześniej elektroda węglowa jest już jedynie wspomnieniem, a stan technologii spawalniczych na dzień dzisiejszy jest wysoce zaawansowany. W dużej mierze opiera się na automatyzacji i robotyzacji procesów. Takie rozwiązanie znacząco podniosło komfort oraz higienę pracy w halach produkcyjnych, zmniejszając jednocześnie brak powtarzalności produkcji i koszty rekrutacji nowych pracowników. Nie oznacza to jednak całkowitego pominięcia spawaczy w procesie, gdyż w pewnych zadaniach to wciąż człowiek dominuje nad maszyną, jak chociażby spawanie w pozycjach przymusowych. Gdyby więc określić rolę robota w spawalnictwie, można by go scharakteryzować jako alternatywną i korzystną, ale jednak wciąż jedynie formę odciążenia spawacza.

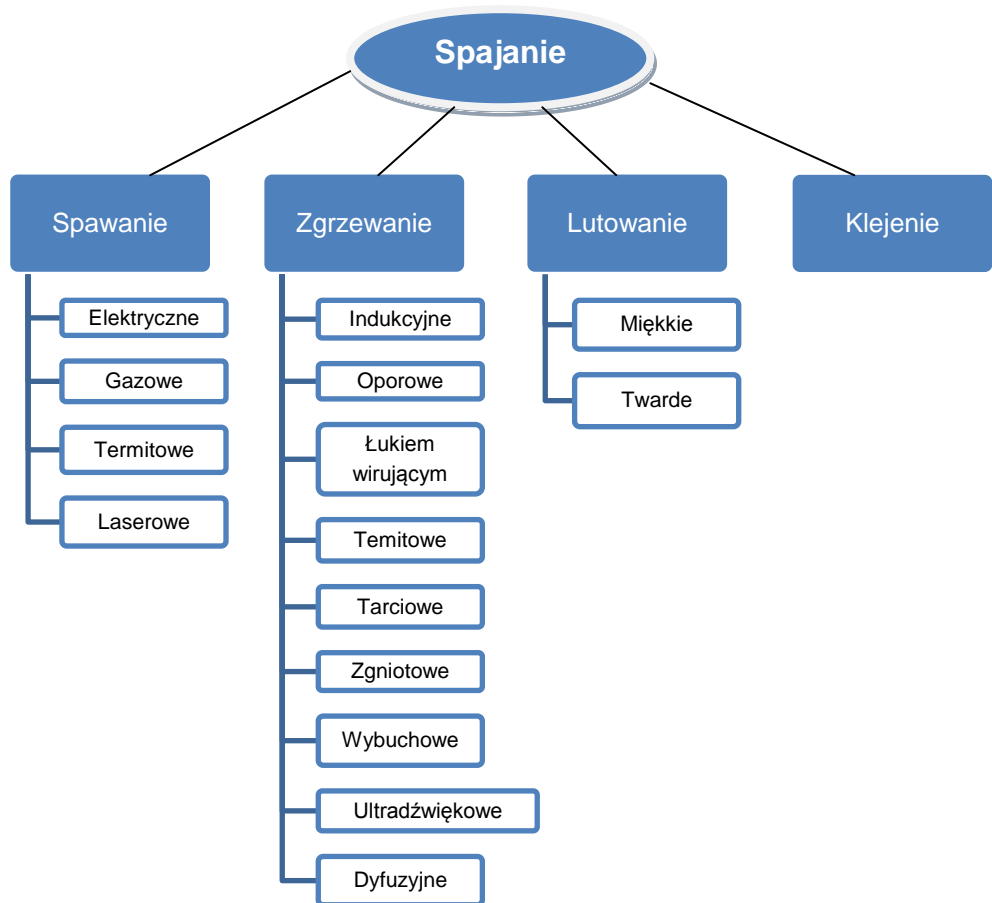
Jednakże niezależnie od tego, czy złącze będzie wykonywane przez maszynę czy wykwalifikowanego pracownika, bardzo ważnym aspektem w całym procesie jest prawidłowy dobór metody, parametrów oraz środowiska spawania. Ma to wpływ na późniejszy kształt i wymiary połączenia, które muszą być odpowiednie do danej funkcji, jaką pełnić ma dana część. Nawet najlepszej klasy robot z błędnie wprowadzonymi wytycznymi może nie wykonać spoiny spełniającej stawiane przez inżynierów warunki. A te z kolei określone są na podstawie tego, w jakim otoczeniu oraz w jaki sposób będzie eksploatowana konstrukcja. Okazuje się bowiem, że odpowiedniej wartości siła mechaniczna oddziałująca jednocześnie ze zjawiskami środowiskowymi może mieć niekiedy katastrofalne skutki.

Niniejsza praca dyplomowa, realizowana w Katedrze Inżynierii Materiałowej i Spajania Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej, poświęcona jest analizie statystycznej wyników badań wytrzymałościowych. Podstawowy cel pracy to określenie wpływu parametrów spawania i warunków eksploatacji na odporność wobec niszczenia wodorowego poszczególnych obszarów złączy spawanych ze stali superdupleks. Dodatkowym celem pracy było opracowanie modeli umożliwiających prognozowanie powstawania pęknięć w warunkach stałego obciążenia.

2. Spawanie

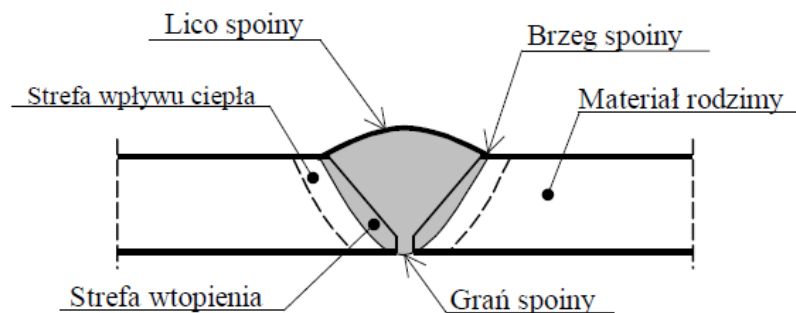
2.1. Omówienie terminu spawania

W dzisiejszych czasach istnieje wiele powszechnie znanych i wykorzystywanych metod łączenia materiałów. Schemat na rys. 1 obrazuje podstawowe podgrupy, na jakie dzieli się dziedzina spawania.



Rys. 1 Główne metody spawania oraz ich rodzaje [40]

Spawanie zatem jest jedną z głównych gałęzi spawania, a jest to proces polegający na nadtopieniu brzegów łączonych elementów, stopieniu i wymieszaniu powstałego stopiwa oraz doprowadzeniu do powtórnej krystalizacji roztopionego materiału. Materiał części łączonych ze sobą nazywany jest materiałem rodzimym. Wspomniane wcześniej stopiwo wytwarzane jest poprzez stopienie materiału dodatkowego (elektrody lub też drutu). Podczas wytwarzania złącza spawanego w strefie wpływu ciepła (SWC), czyli obszarze pomiędzy materiałem rodzimym a spoiną, zachodzą określone zjawiska fizyczne, które spowodowane są dostarczaną podczas spawania energią cieplną [1,14].

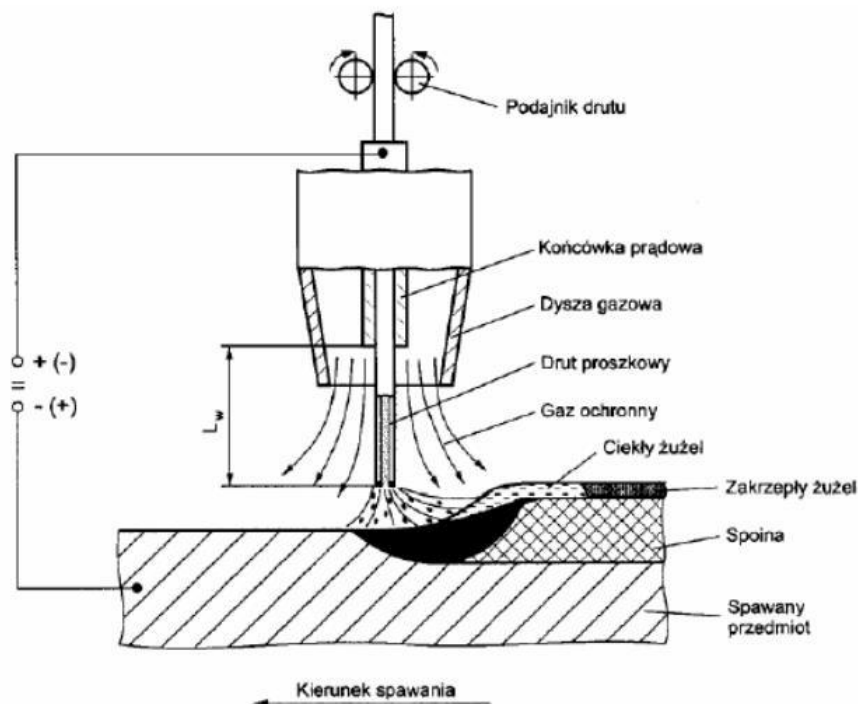


Rys. 2 Strefy złącza spawanego

2.2. Wybrane metody spawania

2.2.1. Spawanie drutem proszkowym w osłonie gazów ochronnych (FCAW)

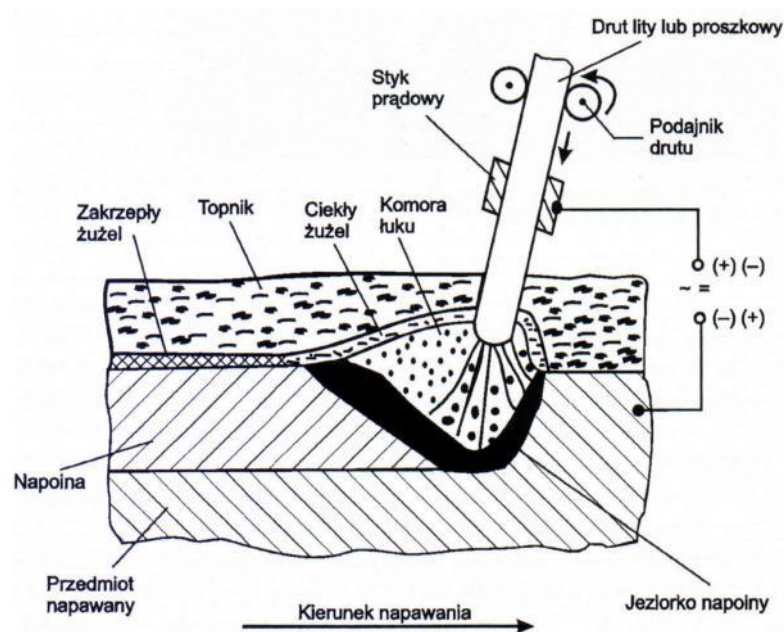
FCAW (Flux-Cored Arc Welding) to jedna z metod spawania łukowego. Podczas procesu łączenia jest w niej wykorzystywany drut proszkowy z rdzeniem topnikowym o konstrukcji rurkowej ze stali wypełnionej proszkiem, który pełni rolę otuliny elektrody. Spawanie metodą FCAW można wykonywać w osłonie gazów aktywnych, gazów obojętnych, ale także bez osłony gazowej, tj. drutem samoosłonowym. Proces polega na stopieniu brzegów łączonych i drutu proszkowego ciepłem łuku spawalniczego, który jarzy się pomiędzy koszulką rurkową drutu a powierzchnią spawaną. Jakość złącza powstałego na skutek spawania metodą FCAW jest bardzo dobra, natomiast ilości żużla tworzącego się na spoinie oraz odprysków są niewielkie [4,6]. Istotę spawania FCAW przedstawia schemat na rys. 3.



Rys. 3 Schemat spawania drutem proszkowym [8]

2.2.2. Spawanie automatyczne łukiem krytym pod topnikiem (SAW)

SAW (Submerged Arc Welding) jest metodą polegającą na tym, że łuk jarzy się pomiędzy elektrodą a powierzchnią spawaną w środowisku odizolowanym od powietrza warstwą topnika. Proces ten jest częściowo lub całkowicie zmechanizowany, ponieważ elektroda zwykle w postaci drutu, jest podawana w sposób ciągły z nastawioną stałą prędkością lub ulegającą samoregulacji, zależnie od parametrów spawania. Zwykle również ruch postępowy łuku odbywa się mechanicznie, więc spawanie to jest powszechnie nazywane automatycznym. Spawanie SAW jest spawaniem wysoce wydajnym, które pozwala uzyskać bardzo dobrą jakość spoiny. Ważny jest także aspekt warunków pracy spawacza, które są wyjątkowo korzystne ze względu na obecność łuku pod warstwą topnika. Jest to jednak metoda wykorzystywana do spawania jedynie w pozycji podolnej i nabocznej a możliwa do zastosowania jedynie w halach produkcyjnych. Dodatkowym utrudnieniem jest też konieczność wykonania operacji przygotowania topnika, a konkretnie zabiegu suszenia, przed jego wprowadzeniem do zasobnika [4,14].



Rys. 4 Istota spawania łukiem krytym [6]

2.3. Parametry spawania

Jakość spoiny jest uzależniona od jej kształtu i wymiarów. Najkorzystniejszym ukształtowaniem jest odpowiedniej wysokości nadlew lica oraz łagodne przejście od spoiny do materiału rodzimego. Właściwa szerokość złącza sprzyja odgazowaniu spoiny, natomiast od współczynnika kształtu spoiny zależy skłonność do pęknięcia. Podczas procesu spawania wiele czynników technologicznych ma wpływ na późniejszy wygląd spoiny [33,34].

Takimi parametrami są:

- Rodzaj i biegunowość prądu spawania,
- Natężenie prądu spawania i napięcie łuku,
- Rodzaj i średnica elektrody (drułu),
- Prędkość spawania,
- Rodzaj i natężenie przepływu gazu osłonowego (dla spawania w osłonie gazowej),
- Rodzaj i wymiary materiału dodatkowego (dla spawania TIG),
- Pochylenie elektrody (drułu),
- Wolny wylot (dla spawania drutem spawalniczym),
- Prędkość podawania drutu (dla spawania drutem spawalniczym).

3. Spawalność

3.1. Definicje spawalności

Spawalność jest przydatnością danego materiału do procesu spawania. Jako, że historia spawalnictwa ma już długie korzenie, pierwsze definicje spawalności istnieją już od dawna. W 1924 roku została opublikowana jedna z nich, stosunkowo prosta, a głosi ona że [11]:

„Materiał uważa się za spawalny, jeżeli różne części ze stali o podobnym składzie chemicznym dają się połączyć w jedną całość, przy użyciu ciepła”.

Następne pojęcie spawalności zostało przyjęte przez Międzynarodowy Instytut Spawalnictwa [26]:

„Materiał metaliczny jest spawalny w ustalonym stopniu przy użyciu danego procesu i do danego zastosowania, gdy przy odpowiednim sposobie postępowania można uzyskać ciągłość metaliczną za pomocą spawania, a połączenia spełniają wymagania dotyczące ich miejscowych własności i ich wpływu na konstrukcję, w skład której wchodzi.”

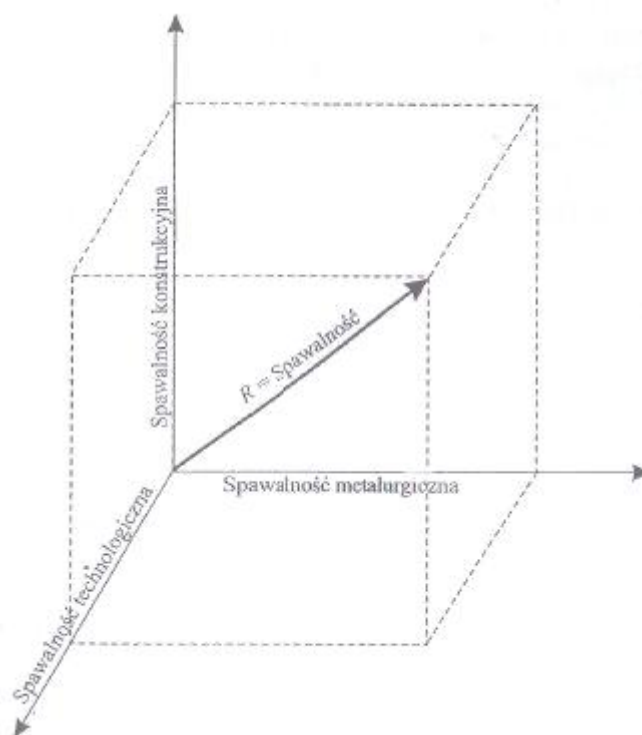
Poniżej natomiast przytoczono stosunkowo nowy pogląd polskiego eksperta w dziedzinie spawalnictwa [4]:

„Spawalność można określić jako zespół cech charakteryzujących przydatność i podatność określonego materiału na spawanie wykonane przyjętymi metodami i z zastosowaniem takich środków postępowania, w wyniku których powinno się uzyskać połączenie o wymaganych właściwościach (np. fizycznych, chemicznych, mechanicznych, eksploatacyjnych).”

Z biegiem czasu dziedzina spawalnictwa inaczej definiowała spawalność materiału, ponieważ okazywało się, że aby ją dokładnie określić, należy brać pod uwagę coraz to więcej czynników – zarówno dotyczących samego składu chemicznego, jak i przystosowania materiału do samej techniki spawania. Dzisiaj spawalność jest rozpatrywana w trzech płaszczyznach: spawalności technologicznej, metalurgicznej oraz konstrukcyjnej. Jeżeli chodzi o samo zdefiniowanie wymienionych płaszczyzn, to wygląda ono następująco:

- **Spawalność technologiczna** obejmuje czynniki, które związane są z technologią spawania oraz tym, jaki ma ona wpływ na własności złącza (metoda oraz parametry procesu).
- **Spawalność metalurgiczna** to aspekty dotyczące zachowania się materiału podczas spawania, czyli struktura materiału rodzimego, która zależy głównie od składu chemicznego.
- **Spawalność konstrukcyjna** natomiast dotyczy wszelkich informacji o przystosowaniu elementu konstrukcyjnego do naprężeń, które powstały w wyniku tworzenia złącza, a także podczas jego eksploatacji [6].

Na rys. 5 spawalność przedstawiona została jako suma wektorowa spawalności technologicznej, metalurgicznej oraz konstrukcyjnej.



Rys. 5 Przedstawienie pojęcia spawalności jako wektora R [26]

3.2. Klasyfikacja spawalności stali

Spawalność została poprzednio przedstawiona jako składowa trzech kategorii i rzeczywiście – w celu dokładnego określenia możliwości stali względem spawania musi być ona rozpatrzona według każdego z tych aspektów. Do oceny spawalności stali wykorzystywane są metody eksperymentalne (badania próbek z rzeczywistą strefą wpływu ciepła oraz badania symulacyjne), analityczne oraz graficzne (dla stali niestopowych, niskostopowych oraz wysokostopowych). Jednakże przeważnie wyjściowym kryterium, od którego rozpoczyna się charakterystykę stali pod kątem spawalności, jest określanie jej na podstawie stosunku składu chemicznego do grubości łączonych ze sobą elementów. Jest to ocena analityczna, a stosunek

wcześniej wspomniany określany jest mianem równoważnika węgla CEV. Jego wartość można obliczyć z poniższego wzoru [38,10,6]:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} [\%] \quad (1)$$

Znając współczynnik CEV można określić stale jako:

Stale łatwo spawalne – współczynnik CEV jest mniejszy niż 0,42% - są to stale, które przy założeniu, że grubość łączonych elementów jest mniejsza niż 40 mm, tworzą połączenie bez zanieczyszczeń, nieciągłości czy występujących porów w spoinie. Istotne jest w tym wypadku, że połączenie jest wykonywane bez dodatkowych operacji oraz obróbki cieplnej po procesie.

Stale o ograniczonej spawalności – współczynnik CEV wynosi od 0,42% do 0,60% - w połączeniu o grubości do 20 mm tworzą podobnie jak stale łatwo spawalne złącze bez przywołanych wad, jednakże w tym przypadku należy już uważnie odnosić się do parametrów spawania, tzn. większa średnica spoiwa, mniejsza prędkość spawania.

Stale trudno spawalne – współczynnik CEV jest większy od 0,60% - mogą być wykorzystane do wykonania tego typu połączenia, aczkolwiek również z bezpiecznym doбором parametrów i dodatkowo wykonanym zabiegiem obróbki cieplnej po procesie spawania.

Występują w środowisku stali także **stale niespawalne**, czyli jak sama nazwa wskazuje, nie dające wymaganego połączenia, nawet pomimo wykonania dodatkowych zabiegów i zachowania środków ostrożności [33,39].

4. Stale duplex i superduplex

4.1. Charakterystyka stali duplex

Stal duplex jest materiałem dwufazowym zawierającym dwa składniki mikrostruktury: ferryt i austenit. Strukturę ferrytyczno-austenityczną duplex zawdzięcza składowi chemicznemu, (która zawiera przede wszystkim chrom (21-28%) i nikiel (3,5-8%) oraz takie pierwiastki jak molibden, azot, a niektóre gatunki takie dodatki jak: mangan, miedź czy wolfram) oraz parametrom obróbki cieplnej pozwalających uzyskać około 50% ferrytu i 50% austenitu. Dzięki temu jest to stal łącząca w sobie dobre właściwości stali zarówno jednej, jak i drugiej fazy. W przypadku ferrytu jest to dobra wytrzymałość i odporność na korozję naprężeniową, podczas gdy austenit zapewnia ciągliwość. Jedną z głównych zalet jest jej niski koszt, spowodowany obniżoną zawartością niklu w porównaniu do stali austenitycznej. Początkowo stal duplex nie znalazła szerokiego zastosowania ze względu na jej ograniczoną spawalność. Jednakże z czasem pojawiały się nowe gatunki, coraz lepiej przystosowane do procesu spawania ze względu na swój skład chemiczny i dzisiaj stale duplex są atrakcyjnym zamiennikiem standardowych stali odpornych na korozję [13].

4.2. Spawalność stali duplex

Spawalność tego typu stali jest zależna od tego, czy występuje równowaga pomiędzy ferrytem i austenitem. Ponieważ chrom i molibden zwiększają ilość ferrytu, a nikiel i azot stabilizują austenit, można stwierdzić, że spawalność stali duplex w dużej mierze określa jej skład chemiczny. Innym czynnikiem, który jednak zmniejsza spawalność, jest jednocześnie zmniejszenie odporności na korozję elektrochemiczną występujące na skutek wydzielania się faz międzymetalicznych lub węglików w złączach [7]. Aby ograniczać te wydzielania należy odpowiednio dobierać parametry spawania.

4.3. Spawalność stali superduplex

Chrom, molibden i azot to składniki, które poprawiają odporność stali duplex na korozję, a w szczególności korozję wżerową. Odporność tą jest określana równoważnikiem PRE_N , który pozwala na uszeregowanie poszczególnych gatunków stali duplex zgodnie z ich odpornością na tego rodzaju korozję. Równoważnik PRE_N oblicza się z poniższego wzoru [19]:

$$PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N \quad (2)$$

Grupa stali superduplex charakteryzuje się indeksem odporności na korozję wżerową PRE_N wyższym od 40. Odporność korozyjna tej grupy odpowiada poziomowi reprezentowanemu przez tzw. stale superaustenityczne.

Tablica 1: Skład chemiczny typowych gatunków stali odpornych na korozję typu duplex [19].

Gatunek stali Klasyfikacja (Stary UNS/Nowy UNS/W.N)	Skład chemiczny [%]						
	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W	PRE_N
23% Cr – bez Mo – stal nierdzewna duplex							(~25)
SAF 2304 S 32304/S 39230/ UR 35 N 14362	23	4	-	0.2	0.1	-	25
22% Cr – standardowa stal nierdzewna duplex							30 – 36
SAF 2304 UR 35 N S 31803/S 39205/ AF 22 1.4462	22	5.3	3	0.17	-	-	35
25% Cr (0-2,5% Cu) – stal nierdzewna duplex							32 – 40
Ferrallium 255 S 32550/S 39253	26	5.5	3	0.18	1.6	-	38
DP 3 S 31260/S 39226	25	6.5	3	0.16	0.5	0.3	37
25% Cr – stal nierdzewna superduplex							(>40)
SAF 2507 S 32750/S 39275	25	7	3.8	0.27	-	-	42
UR 52 N+ S 32550/S 39253	25	6	3.8	0.26	1.5	-	42
Zeron 100 S 32760/S 39276	25	7	3.8	0.25	0.7	0.7	41

5. Pęknięcia w złączach

Z dotychczasowej wiedzy można określić materiał jako spawalny jeśli będzie możliwe uzyskanie spoiny o ciągłości metalicznej, czyli innymi słowy, takiej na której podczas procesu spawania nie będą powstawać pęknięcia. Zakładając, że przy klasyfikacji pęknięć w złączach jako kryterium przyjmowany jest najzwyczajniej czas, to mogą być one dzielone na dwa rodzaje: pęknięcia technologiczne oraz pęknięcia eksploatacyjne.

5.1. Pęknięcia technologiczne

Pęknięcia technologiczne powstają podczas wykonywania spoiny lub też po pewnym czasie od zakończenia procesu, kiedy nie działają jeszcze obciążenia związane z użytkowaniem łączonych elementów. Mogą być one:

- spowodowane kruchością,

k która może występować w wysokich temperaturach i są to wówczas pęknięcia nazywane krystalizacyjnymi lub gorącymi. Temperatura jest wtedy wyższa niż połowa wartości temperatury topnienia (T_t) materiału. Natomiast pęknięcia na zimno tworzą się w temperaturach przemiany austenitu w martenzyt i występują przede wszystkim w stalach o zwiększonej hartowności. Zazwyczaj pęknięcia gorące występują w metalu spoiny, zaś zimne w strefie wpływu ciepła lub w spoinie.

- spowodowane naprężeniami i odkształceniami,

w złączach spawanych, wynikających z procesu krzepnięcia i stygnięcia spoin i związanym z tym zjawiskiem skurczu; wytwarzają się wtedy pęknięcia lamelarne oraz wyżarzeniowe (relaksacyjne). Lamelarne, inaczej rozwarstwieniowe, występują najczęściej we wnętrzu blachy i rzadko dochodzą do jej powierzchni. Pęknięcia te charakteryzują się schodkowym przebiegiem. Natomiast wyżarzeniowe występuje w strefie wpływu ciepła i materiale rodzimym w wyniku ponownego nagrzewania wyrobu po spawaniu, podczas zabiegów cieplnych [28,4,12].

5.2. Pęknięcia eksploatacyjne

Pęknięcia eksploatacyjne występują dopiero po konkretnym czasie eksploatacji złącza spawanego, kiedy to jest ono poddane obciążeniom eksploatacyjnym. Tego typu pęknięcia dzielone są na pęknięcia kruche oraz zmęczeniowe. Kruche mają miejsce, gdy jednocześnie materiał w pewnym stopniu utraci swoje właściwości plastyczne, co dzieje się zazwyczaj na skutek obniżenia jego temperatury oraz w istniejącym karbie geometrycznym pojawiają się naprężenia własne związane z obciążeniami eksploatacyjnymi. Zmęczeniowe natomiast, jak sama nazwa wskazuje, opierają się na zmęczeniu materiału, poprzez powstawanie i postępowanie pęknięć przez wielokrotne, zmieniających się okresowo, naprężenia wywołane obciążeniami mechanicznymi czy też cieplnymi [10,26].

6. Oddziaływanie wodoru na metale

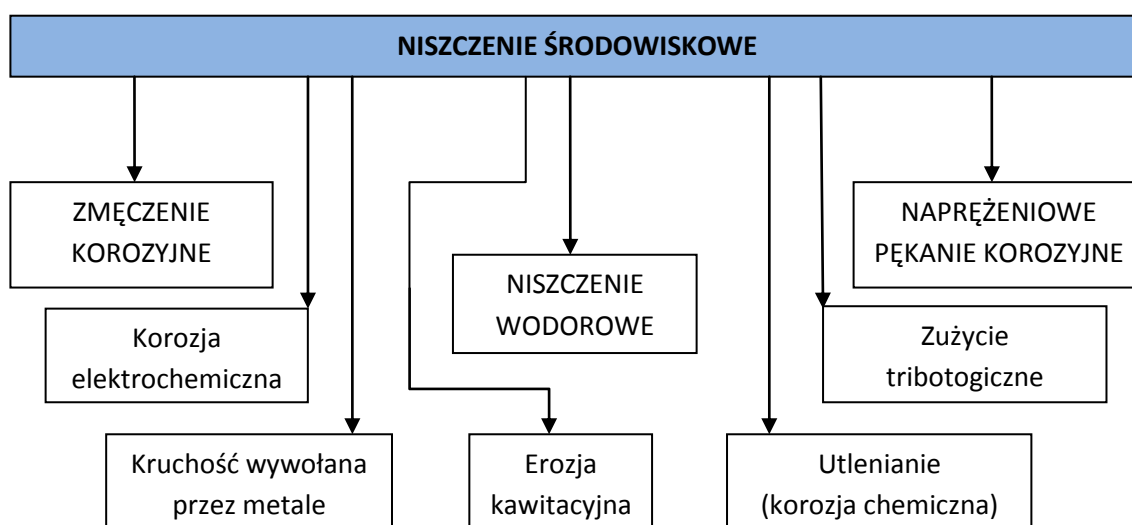
Wodór jest bardzo ważnym pierwiastkiem dla człowieka. Jest on wykorzystywany jako źródło energii a należy także zwrócić uwagę na nieustanne badania, które mają na celu przekształcenie wodoru w główny nośnik energii. Byłby znacznie bardziej sprzyjający środowisku od gazu, ropy naftowej czy też węgla. Jednakże jeśli chodzi o wodór i jego oddziaływanie na materiały metalowe, to niestety ma on negatywny wpływ na niemalże wszystkie gatunki stali. Powoduje on obniżenie ich właściwości mechanicznych, a także przyczynia się znacznie do procesu pękania złączy. To właśnie wodór jest powodem powstawania uszkodzeń w rurociągach przepuszczających substancje ropopochodne, a także dużej ilości usterek maszyn, co niekiedy ciągnie za sobą bardzo groźne konsekwencje [15].

6.1. Charakterystyka wodoru

Wodór jest pierwiastkiem o liczbie atomowej 1 i masie wahającej się pomiędzy 1,00784u a 1,00811u, najczęściej występującym w całym wszechświecie. Na Ziemi wodór jest raczej spotykany w postaci cząsteczkowej H_2 , bezbarwnej, bezwonnej i nietrującej. Jego atom posiada konstrukcję najprostszą ze wszystkich pierwiastków i jest on najlżejszy. Posiada niewielką aktywność chemiczną a przy podwyższonej temperaturze wchodzi w reakcję z wieloma niemetalami oraz metalami aktywnymi. W większych ilościach może być niebezpieczny dla zdrowia człowieka, ponieważ wypiera tlen z powietrza [37,42].

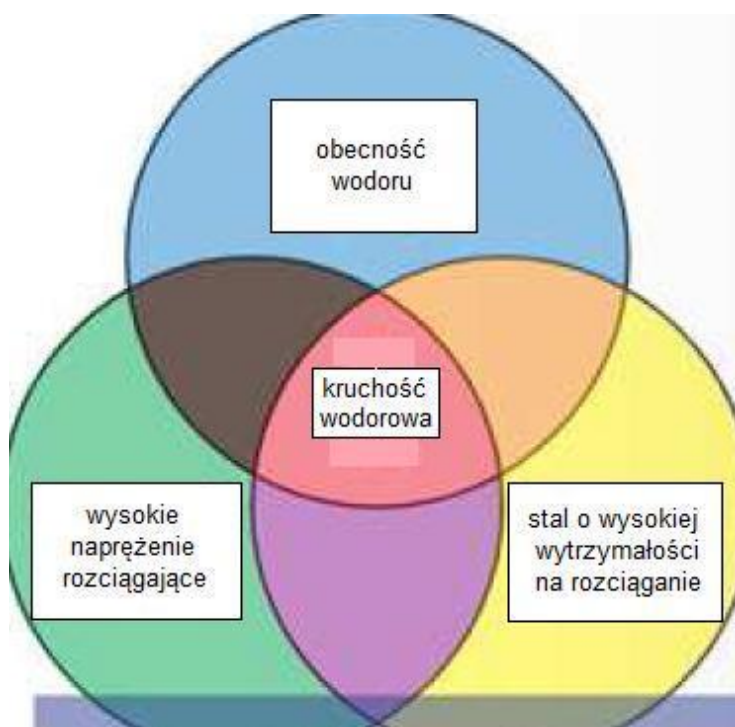
6.2. Niszczenie wodorowe

Termin niszczenia wodorowego, niegdyś nazywany kruchością wodorową, określa zmiany w strukturze materiału oraz powstawanie pęknięć na skutek wpływu wodoru. Niszczenie wodorowe często następuje z innymi procesami niszczenia pochodzącymi ze środowiska – wówczas jest to niszczenie zwane środowiskowym. Schemat na rys. 6 obrazuje z jakimi formami niszczenia może jednocześnie zachodzić niszczenie wodorowe [29].



Rys. 6 Główne formy niszczenia środowiskowego materiałów [2]

Oprócz zmniejszenia wytrzymałości mechanicznej stali, w którą wnika wodór i zwiększenia jej kruchości, ważną informacją jest to, że ma on znaczący wpływ na intensywność, z jaką przebiega proces korozji. Najbardziej groźne niszczenie wodorowe jest dla stali o wysokiej wytrzymałości, ze względu na małą zawartość wodoru. W praktyce, najbardziej narażone na negatywne oddziaływanie wodoru są konstrukcje ze stali, które przeznaczone są do przebywania w środowisku wody morskiej [5]. Wodór jest szkodliwy nie tylko dla samej stali, ale także niekorzystnie wpływa na wykonane spoiny. Jak wiadomo złącze spawane jest połączeniem nierozłącznym i oddziałujące nawet wysokie naprężenia nie powodują jego pęknięć. Jednak wraz z przenikaniem wodoru do spoiny, wzrasta skłonność do pęknięcia złączy. Większa jego zawartość bardziej zagraża wytrzymałości takiego połączenia [24].



Rys. 7 Czynniki wpływające na kruchość wodorową elementów złącznych [31]

6.3. Podział kruchości wodorowej

Kruchość wodorową można podzielić według dwóch kategorii: ze względu na czas nawodorowania oraz biorąc pod uwagę temperaturę w jakiej odbywa się proces. Pierwsze kryterium rozgranicza wewnętrzną oraz zewnętrzną kruchość. Wewnętrzna następuje wtedy, gdy wodór jest pochłaniany przez materiał zanim zaczną oddziaływać naprężenia, natomiast zewnętrzna – kiedy wodór jest absorbowany równocześnie z działającymi naprężeniami. Przy czym niszczenie postępujące już podczas eksploatacji może się rozwijać dzięki takim źródłom jak: płyny przepływające przez rurociągi (szkodliwe dla samych rurociągów; chodzi tutaj o gaz ziemny, siarkowodory, kwaśne roztwory), woda morska, wilgoć znajdująca się powietrzu i glebie oraz reakcje anodowe i katodowe występujące w szczelinach.

Jeżeli jednak wyznacznikiem jest temperatura, to ataki wodorowe określamy jako wysokotemperaturowe oraz niskotemperaturowe. Wartością określającą poszczególny atak wodorowy jest, czy następuje on w temperaturze wyższej od 200 °C czy też od niej mniejszej. Podczas wysokotemperaturowego ataku pęcherze wodorowe pojawiają się jako tzw. „rybie oczy” na wtrąceniach niemetalicznych. Natomiast niskotemperaturowy atak charakteryzuje się zmniejszonym współczynnikiem dyfuzji, a powiększonym pułapkowaniem wodoru [2].

6.4. Miary niszczenia wodorowego

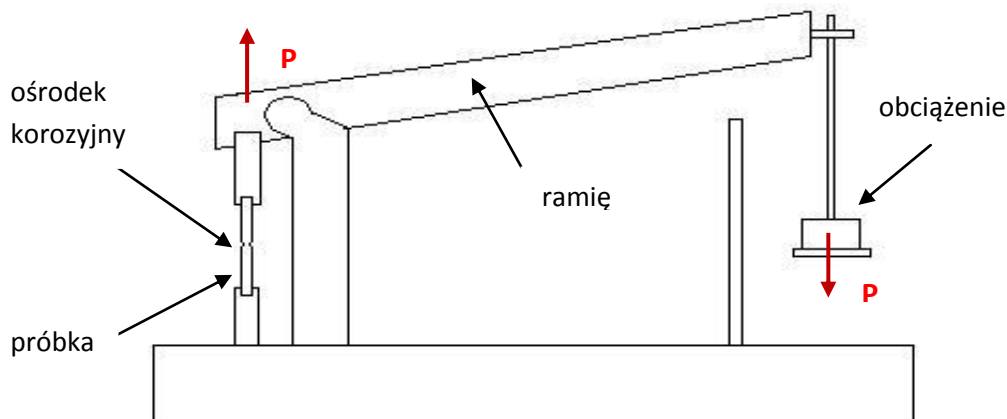
Stopień niszczenia wodorowego możliwy jest do określenia podczas badań mechaniczno-korozyjnych, których rodzaje występują trzy: stałego obciążenia (*Constant Load*), stałego odkształcenia (*Constant Deformation*) oraz próba odkształcania z małą prędkością (*Slow Strain Rate Testing*) [30]. Poziom zaawansowania niszczenia wodorowego może być mierzony po ekspozycji korozyjnej lub podczas badania, kiedy to próbka znajduje się w środowisku korozyjnym. Wartości, które ten stopień określają, to:

- Spadek własności plastycznych lub energii zniszczenia
- Czas do zniszczenia
- Szybkość rozwoju pęknięcia, liczba i długość pęknięć

7. Próba przy stałym obciążeniu

7.1. Idea próby

Metoda stałego obciążenia próbek polega na ich jednakowym obciążeniu przez całkowity okres badania – od momentu przyłożenia naprężenia do próbki do czasu, w którym ulegnie ona zniszczeniu. Jak wyjaśnia to norma dotycząca badań korozyjnych, próba przy stałym obciążeniu odtwarza proces niszczenia korozyjnego, gdzie naprężenia oddziałujące na testowaną próbkę pochodzą od obciążeń zewnętrznych. Rosną one wraz z czasem trwania badania, co tłumaczy fakt, że wzrostowi pęknięcia towarzyszy odkształcenie plastyczne próbki w postaci zmniejszenia przekroju poprzecznego [18]. Na rys. 8 przedstawiony jest schemat ideowy rozciągania próbki za pomocą stałego obciążenia.



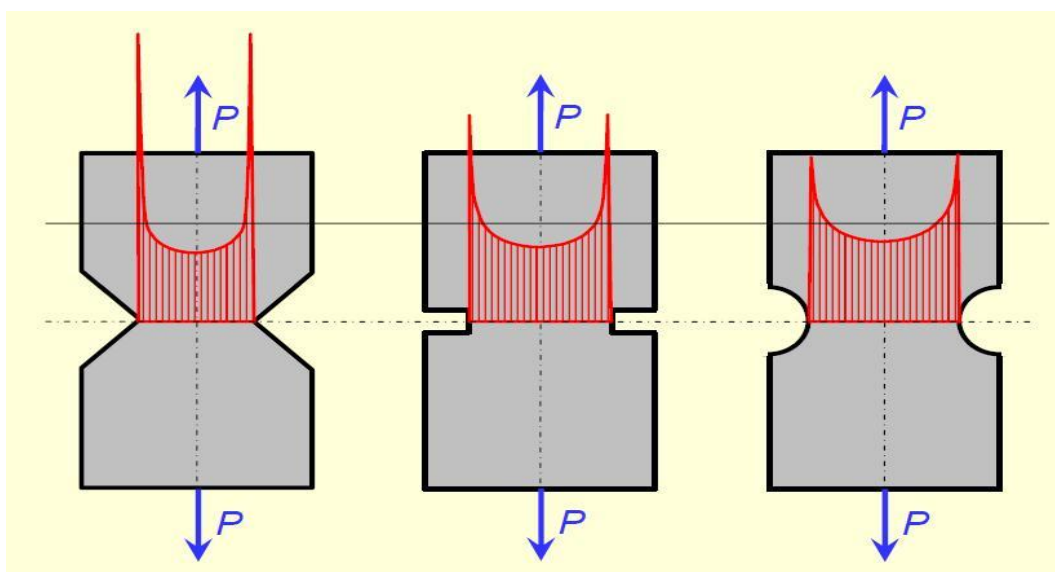
Rys. 8 Schemat ideowy obciążania próbki metodą *Constant Load*

7.2. Środowisko badań

Przeprowadzanie badania może się odbywać w środowisku powietrza, jednak najczęściej próbka znajduje się w środowisku cieczy lub gazów, które sprzyjają postępowaniu procesu korozji danego stopu, z którego wykonana jest próbka. Przykładem tego może być stosowanie wrzącego chlorku magnezu w przypadku próbek ze stali nierdzewnych, czy też wrzących azotanów, jeżeli badane są próbki ze stali węglowych. Wpływ w procesie pęknięcia korozyjnego mogą mieć również czynniki elektrochemiczne: przyłożenie prądu lub potencjału ze źródła zewnętrznego. Ważnym parametrem jest także temperatura, w jakiej przeprowadzane jest badanie. Wzrost temperatury często skutkuje spowolnieniem całego procesu, ze względu na wzrost szybkości reakcji (jaką jest na przykład tworzenie się warstw ochronnych). Należy więc zadbać, aby temperatura otoczenia próbki odpowiadała temperaturze jaka zwykle panuje w warunkach eksploatacji [18].

7.3. Próbkki

Rodzaje próbek przygotowywanych do badania metodą stałego obciążenia są dwa: gładkie i z karbem. Gładkie pozwalają na obserwację podczas próby utworzenia pierwszego pęknięcia i jego rozwój na skutek obciążenia. Natomiast drugi rodzaj, z karbem geometrycznym lub wstępnie utworzonym pęknięciem, ukazuje z jaką prędkością postępuje wytworzona wada pod wpływem eksploatacji. Kształt próbki jest istotnym zagadnieniem, ponieważ ma wpływ na rozkład naprężeń podczas rozciągania. W próbkach gładkich linie sił przebiegają jednakowo. Jednak w przypadku przekroju osłabionego karbem występuje spiętrzenie naprężeń [16,30]. Rozkład naprężeń podczas rozciągania, w zależności od rodzaju karbu oraz jego głębokości jest przedstawiony na rys. 9.



Rys. 9 Rozkład naprężeń dla różnego rodzaju próbek [35]

8. Analiza regresji

Analiza regresji jest jedną z najbardziej znanych i stosowanych narzędzi służących analizie danych statystycznych. Można ją określić jako metodę, która pozwala na podstawie związku pomiędzy pewnymi wielkościami i znając wartości części z nich, przewidzieć wartość pewnych zmiennych nieznaną. Stałe doskonalenie metody regresji sprawiło, że jest w dzisiejszych czasach bardzo chętnie używana w wielu zastosowaniach technicznych.

8.1. Regresja prosta

Regresja prosta to rodzaj regresji, dla której model jest wyznaczany pomiędzy cechami ze sobą skorelowanymi, a zależność pomiędzy zmienną niezależną (X) a zmienną zależną (Y) jest opisywana za pomocą linii prostej. Regresja prosta zakłada model, w którym wzrost jednej zmiennej powoduje wzrost lub spadek wartości drugiej zmiennej, co definiuje równanie:

$$Y = aX + b \quad (3)$$

Wartości zmiennych muszą mieć postać ilościową. Model ma za zadanie tak przewidywać wartość zmiennej objaśniającej, poprzez wyliczanie współczynników regresji, żeby błąd oszacowania był jak najmniejszy. Ze względu na przejrzystość regresji prostej jest to najczęściej wykorzystywany rodzaj analizy danych [3,9,36].

8.2. Regresja wieloraka

Regresja wielokrotna jest nazywana także wielokrotną. Główną jej ideą jest ilościowe ujęcie związków pomiędzy wieloma zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi) a zmienną zależną (kryterialną, objaśnianą). Aby model regresji był jak najbardziej wiarygodny, ważne jest aby do modelu wprowadzić możliwie najwięcej istotnych zmiennych niezależnych. Sam model regresji liniowej zmiennej zależnej Y względem zbioru k zmiennych objaśniających X_1, X_2, \dots, X_k określony jest wzorem [20,23]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon, \quad (4)$$

gdzie: β_i – parametry modelu (współczynniki regresji) opisujące wpływ i -tej zmiennej

ε – składnik losowy (S_e)

Najprościej określić przydatność regresji wielorakiej, można w przypadkach, kiedy uzyskiwany wynik (zmienna objaśniana) jest zależny od wielu różnych czynników (objaśniających), a potrzebna jest wiedza dotycząca wartości wpływu poszczególnych czynników na rezultat; który z czynników jest najważniejszy, a który może zostać uznany za statystycznie nieistotny.

8.3. Regresja logistyczna

Model logistyczny stwarza możliwość modelowania i symulacji prawdopodobieństwa zdarzenia opisywanego przez dychotomiczną zmienną (jakościową) y , zależną od kilku różnych zmiennych niezależnych (zarówno ilościowych, jak i jakościowych) x_1, x_2, \dots, x_k . Zależność tę opisuje równanie [20]:

$$P(Y = 1 | x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{e^{(\alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i x_i)}}{1 + e^{(\alpha_0 + \sum_{i=1}^k \alpha_i x_i)}} \quad (5)$$

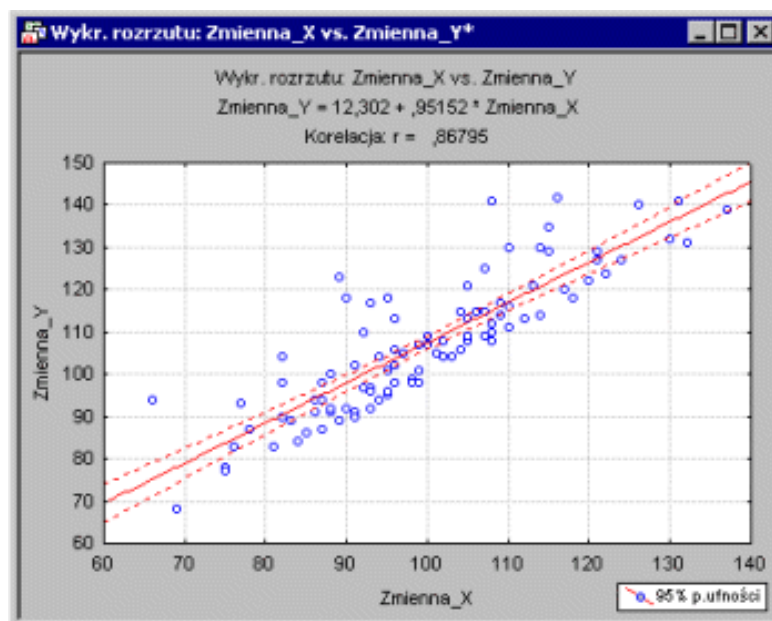
gdzie: $\alpha_i, i = 0, \dots, k$ - współczynniki regresji

x_1, x_2, \dots, x_k - zmienne niezależne (mieralne lub jakościowe)

W naukach biologiczno-medycznych często można spotkać się z sytuacją gdy zmienna zależna jest typu dychotomicznego, czyli przyjmuje dwie wartości, a najczęściej są one wyrażane jako 0 i 1. Przykładowo może być to w przypadku stwierdzenia u pacjenta nowotworu: 1- tak, 0 – nie. Jednak regresja logistyczna nie zamyka się jedynie na tę dziedzinę, jest powszechnie stosowaną formą analizy statystycznej [21]. Podsumowując, jest to metoda pozwalająca określić prawdopodobieństwo wystąpienia jakiegoś wydarzenia, bądź odwrotnie – tego, że nie dojdzie ono do skutku – biorąc pod uwagę wpływające na to zdarzenie czynniki.

8.4. Metoda najmniejszych kwadratów

Metoda najmniejszych kwadratów to jedna z trzech powszechnie znanych metod estymacji punktowej. Termin estymacji punktowej oznacza zabieg prowadzący do znalezienia wartości, którą można określić jako najlepsze przybliżenie nieznanego parametru rozkładu rozpatrywanej zmiennej losowej. Metoda najmniejszych kwadratów bazuje na postulacie Legendre'a wspartym założeniem Gauss'a o rozkładzie błędów normalnym. Sam postulat głosi, że wartością najbardziej prawdopodobną, otrzymaną z szeregu wyników tak samo dokładnych pomiarów, jest taka, od której obliczone odchylenia tych wyników, po podniesieniu do drugiej potęgi i zsumowaniu dają wielkość najmniejszą z możliwych. Czyli przyjęcie do obliczenia odchyłeń wielkości dowolnej innej, niż najbardziej prawdopodobna, da sumę ich drugich potęg (kwadratów) większą. Na podstawie wszystkich danych, poprzez specjalistyczne programy analityczne, oszacowuje się linie trendu (czerwona linia ciągła na rys.10), czyli tendencję rozwojową badanej cechy względem czasu. Jednak metody najmniejszych kwadratów nie należy stosować bez uprzedniego sprawdzenia na wykresie rozrzutu czy w danych nie ma punktów znacząco odstających, które mogą niekorzystnie wpłynąć na trend. Po usunięciu takich punktów z danych i ponownej generacji wykresu rozrzutu, linia trendu może wyglądać zupełnie inaczej [41,42].



Rys. 10 Przykładowy wykres rozrzutu z wyznaczoną linią trendu [41]

8.5. Ocena jakości równania

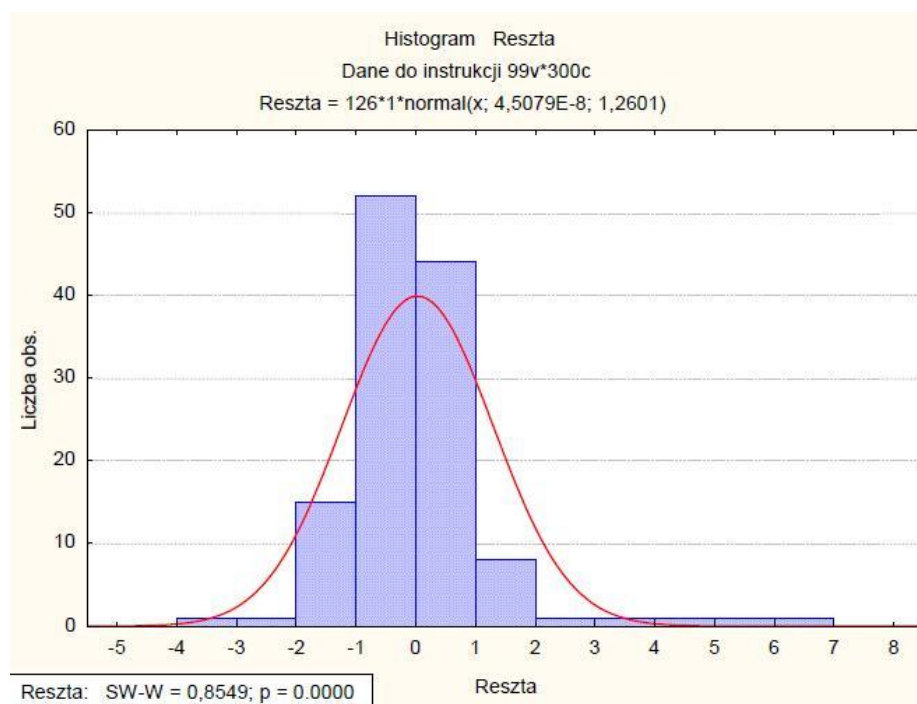
Po wygenerowaniu równania – niezależnie od tego, jaka metoda regresji została wykorzystana – należy określić jego jakość. Czynniki, które najczęściej wykorzystywane są za miary stopnia dopasowania równania, są: współczynnik korelacji liniowej Pearsona – R , współczynnik determinacji – R^2 , skorygowany współczynnik determinacji – $R^2_{\text{popr.}}$ (inaczej nazywany współczynnikiem determinacji dla małych prób) oraz reszty surowe.

Współczynnik korelacji liniowej jest to wartość informująca o stopniu, w jakim badane zmienne są od siebie współzależne. Współczynnik korelacji zawiera się w przedziale $[-1;1]$. Jeżeli korelacja jest ujemna, oznacza to, że wartość jednej cechy jest równoznaczna ze spadkiem cech średnich drugiej cechy. Natomiast przy korelacji dodatniej wzrost jednej cechy powoduje również wzrost wartości średnich drugiej cechy. Współczynnik wynoszący 0 oznacza, że korelacja pomiędzy zmiennymi nie występuje [9,27].

Współczynnik determinacji to inaczej współczynnik określoności, jest miarą jakości dopasowania modelu, która wyjaśnia kształtowanie się zmiennej zależnej. Opisuje, jaki procent zmienności zmiennej objaśnianej jest wyjaśniany poprzez zmienną objaśniającą lub model statystyczny. Współczynnik determinacji zawiera się w przedziale $[0;1]$, a im bliższa jest jego wartość jedności, tym lepsze jest dopasowanie [36].

Skorygowany współczynnik determinacji to współczynnik korygujący wpływ różnej liczby zmiennych na współczynniku determinacji. Jest stosowany do porównywania modeli regresji na bazie tych samych danych, jednak na które ma wpływ różna ilość zmiennych objaśniających. Skorygowany współczynnik determinacji nie jest unormowany oraz może przyjmować wartości ujemne [32,42].

Reszty surowe są to różnice pomiędzy wartościami obserwowanymi, a obliczonymi na podstawie dopasowanego modelu. Określają one wartość błędu oceny poszczególnych wartości zmiennej aproksymowanej. Im lepiej stworzony model oddaje strukturę danych, tym wartość błędu jest mniejsza. Obrazuje to normalność reszt surowych, która jest jednym z założeń metody najmniejszych kwadratów, a oznacza pokrywanie się reszt surowych z rozkładem normalnym Gaussa. Ocenić dokładność tego dopasowania można za pomocą wykresu normalności lub testu Shapiro – Wilka [20,41].



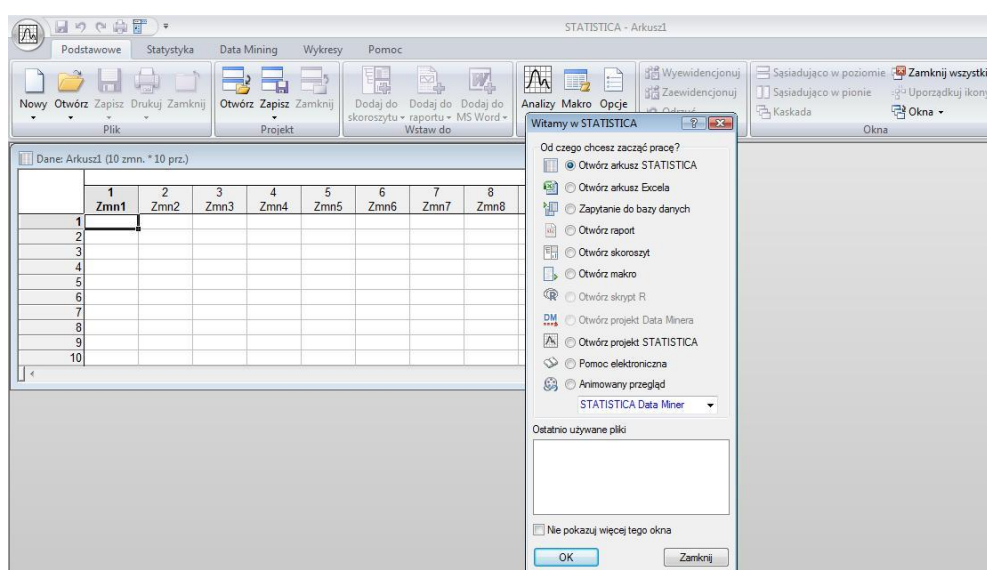
Rys. 11 Przykładowy histogram reszt z wynikami testu Shapiro – Wilka [25]

8.6. Istotność statystyczna

Istotność statystyczna, inaczej oznaczana jako poziom p , jest to wskaźnik rzetelności wyniku. Wykonując badania statystyczne przeważnie zawsze występuje różnica pomiędzy wynikami oczekiwanymi a otrzymanymi. Poziom p określa maksymalne ryzyko błędu, jakie osoba wykonująca badania jest w stanie zaakceptować. Istotność statystyczna jest ustalana przez badacza, który bierze przy tym pod uwagę naturę problemu oraz sposób weryfikacji swojej hipotezy. Najczęściej jest wykorzystywana wartość $p = 0,05$. Im większy jest poziom p , tym mniejsze są szanse, że zaobserwowane zależności pomiędzy zmiennymi w danym badaniu są właściwym wyznacznikiem zależności między odpowiednimi zmiennymi w populacji. Podsumowując, samo występowanie różnic jeszcze nie świadczy o błędzie. Jeżeli test nie wykaże różnic statystycznie istotnych, to wyniki określa się jako sobie równe. Dopiero w przypadku wartości przekraczających akceptowalny poziom błędu, można mówić o różnicach wynikowych [9,36,42].

9. Program Statistica

Statistica jest to jeden z najbardziej znanych programów w dziedzinie statystycznej analizy danych, który jest znaną pozycją w środowisku studentów i pracowników polskich uczelni. Zintegrowany system do statystycznego analizowania danych i wykonywania na ich podstawie wykresów. Użytkownik może podczas korzystania z programu Statistica operować na wszelkiego rodzaju bazach danych, dokonywać ich transformacji oraz tworzyć aplikacje. Oferuje opcje korzystania z najważniejszych metod statystycznych oraz bogaty wachlarz algorytmów do modelowania i prognozowania. Istnieje możliwość zmiany środowiska programu w zależności od obecnie wykonywanej analizy bądź też zwyczajnie od preferencji użytkownika [20,41]. Na rys. 11 pokazany jest ekran startowy programu Statistica.



Rys. 12 Ekran startowy programu Statistica

Statistica umożliwia takie operacje jak:

- wykonywanie statystyk podstawowych, tworzenie tabel
- importowanie zbiorów danych z innych programów
- wykonywanie ogólnych modeli liniowych i nieliniowych
- wykonywanie wykresów korelacyjnych
- wykonywanie ogólnych modeli regresji
- wykonywanie analizy wariancji ANOVA/MANOVA
- wykonywanie dopasowywań rozkładu
- wykonywanie modeli wielowymiarowych
- wykonywanie symulacji rozkładu
- zapisywanie utworzonych modeli w różnych formatach

10. Podsumowanie części teoretycznej

Podsumowując część teoretyczną, można stwierdzić, że spawalność jest jednym z głównych kryteriów uwzględnianych przy doborze stali do skomplikowanych konstrukcji. Dzisiejsze możliwości pozwalają na tworzenie stali o coraz lepszej strukturze. Daje to możliwość uzyskania korzystniejszych cech, nie obniżając przy tym podatności tych stali na proces łączenia za pomocą spawania, a nawet również ją poprawiając.

Przykładem takiego ulepszanego gatunku stali jest stal superdupleks o strukturze ferrytyczno – austenitycznej. Taka struktura daje stali superdupleks dobrą wytrzymałość i odporność na korozję naprężeniową przy zachowaniu ciągliwości. Odpowiednia zawartość chromu, molibdenu i azotu gwarantują wysoki indeks odporności na korozję wżerową niewielkim kosztem, w porównaniu do stali austenitycznej.

Niestety żadna uzyskana struktura stali oraz wykonana na niej spoina nie pozwala zbagatelizować problemu, jakim jest niszczenie wodorowe. Działające na spoinę przez cały okres użytku naprężenia skutkują powstawaniem pęknięć. Natomiast wodór w postaci cząsteczkowej, ze względu na rozmiar cząsteczki, dyfunduje jedynie w nieciągłości materiałów [22]. Kiedy więc wodór zacznie wnikać w materiał i współpracować z naprężeniami w procesie niszczącym, kwestią czasu jest gdy połączenie ulegnie zniszczeniu.

W przeglądanej literaturze występują różne grupy modeli; od dyslokacyjnych (których jest kilka), przez model dekohezji sieci, faz wodorkowych, ciśnienia wewnętrznego po model adsorpcyjny [2]. Faktem jest jednak, że nie ma jednego uniwersalnego modelu, który opisywałby wszystkie formy niszczenia wodorowego. A jeśli chodzi o określanie czasu do zniszczenia, to można opierać się jedynie na szacunku opartym na statystyce.

II Badania własne

11. Cel i zakres pracy

Podstawowy cel pracy to określenie wpływu parametrów spawania i warunków eksploatacji na odporność wobec niszczenia wodorowego poszczególnych obszarów złączy spawanych ze stali superdupleks. Dodatkowym celem pracy było opracowanie modeli umożliwiających prognozowanie powstawania pęknięć w warunkach stałego obciążenia.

Zakres pracy obejmował:

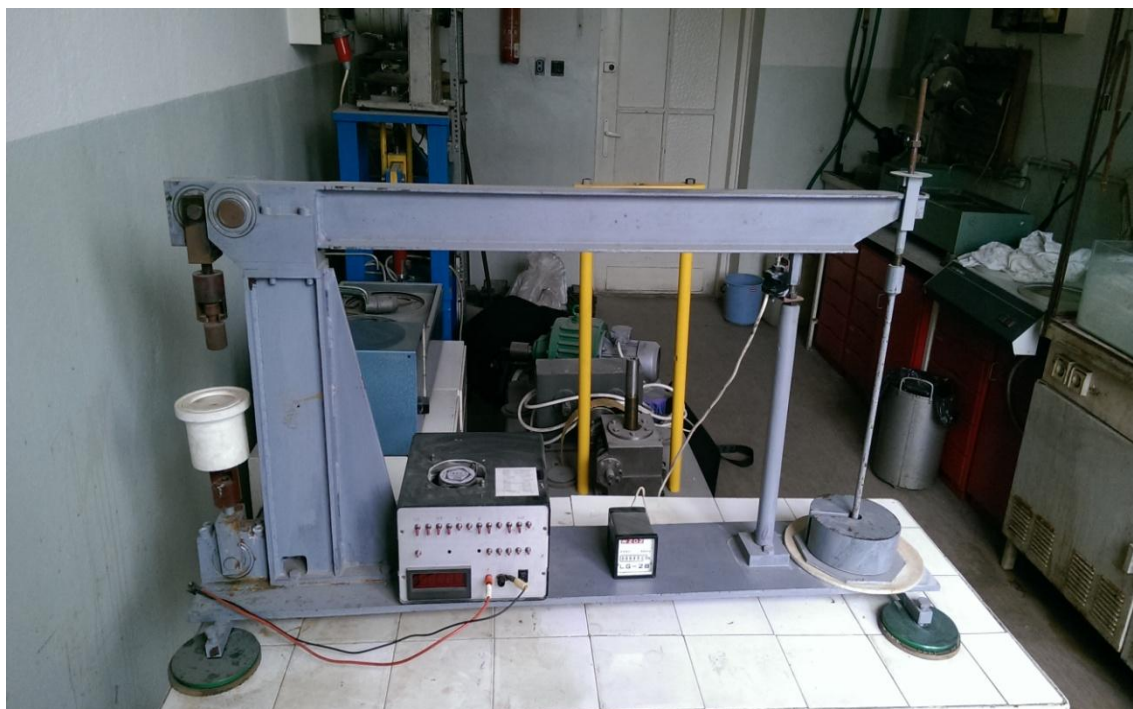
- Zgromadzenie i analizę literatury dotyczącej zagadnienia,
- Zaznajomienie się z generowaniem modeli regresji wielorakiej i logistycznej w programie komputerowym Statistica,
- Przeprowadzenie analizy statystycznej otrzymanych danych (wyników badań zmęzeniowych, wykonanych na stali superdupleks metodą stałego obciążenia),
- Ocenę otrzymanych wyników

Wszystkie wykorzystane do analiz statystycznych wyniki zostały uzyskane podczas badań wykonywanych w Katedrze Inżynierii Materiałowej i Spajania Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej.

12. Przeprowadzone badania

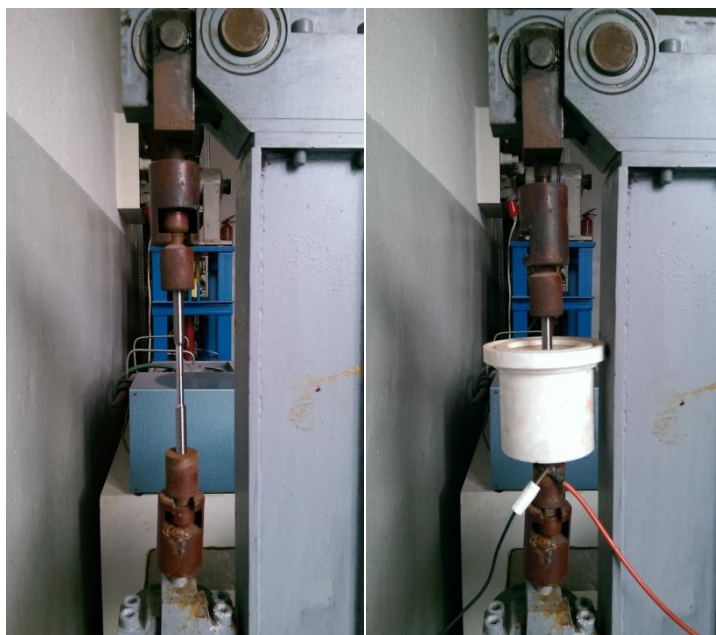
12.1. Stanowisko do badań

Badania, których wyniki poddane zostały dalszej analizie, wykonywane były na maszynie do badań metodą stałego obciążenia (Constant Load). Stanowisko to znajduje się na Wydziale Mechanicznym, w laboratorium badań spawalności (rys.13).



Rys. 13 *Stanowisko do wykonywania prób przy stałym obciążeniu*

Konstrukcja stanowiska bazuje na wykorzystaniu ramienia, dzięki czemu obciążenie próbki ma odpowiednią wartość. Pierwszą czynnością w przygotowaniu próby jest wkręcenie próbki w rolki; widoczne po lewej stronie zdjęcia na rys. 13. Następnie unoszone jest ramię i stabilizowane na odpowiedniej wysokości, aby nie stykało się z czujnikiem osadzonym na końcu pręta. Podniesienie ramienia jest jednoznaczne z podniesieniem podstawki obciążnika razem z zamontowanym obciążeniem, co oznacza rozpoczęcie próby, gdyż próbka od tej chwili „pracuje”. Gdy ramię przestanie stykać z czujnikiem, uruchamia się licznik czasu, a zatrzymuje się on dopiero, kiedy ramię ponownie wróci na swoje miejsce – czyli w momencie zniszczenia próbki. W ten sposób rejestrowany jest czas do zniszczenia próbki. Obok licznika znajduje się zasilacz, który stosowany jest do prób z wykorzystaniem polaryzacji. Jeżeli badania przeprowadzane są w środowisku roztworu, próbka umieszczana jest w zbiorniku, który później zabezpiecza się przed wyciekami za pomocą silikonu. Rys. 14 ukazuje zamocowane próbki dla badań w środowisku powietrza oraz cieczy.



Rys. 14 Zamocowane próbki dla badań w środowisku powietrza (z lewej) i cieczy (z prawej)

12.2. Przygotowane próbki

Próbki, na których przeprowadzone zostały badania, wykonane zostały ze stali superdupleks 2507 (Uranus 52N+). Ilość próbek, których wyniki zostały zarejestrowane to 31, przy czym można było pogrupować je ze względu na umiejscowienie karbu:

- karb w materiale rodzimym – 7 próbek
- karb w strefie wpływu ciepła – 11 próbek
- karb w spoinie – 13 próbek

Złącza w próbkach wykonywane były dwoma metodami: metodą FCAW (energia liniowa spawania – 2,13 kJ/cm) oraz metodą SAW (energia liniowa spawania – 0,98 kJ/cm). Na rys. 15 przedstawiona jest typowa próbka wykorzystana do badań.



Rys. 15 Próbka do badań metodą Constant Load

12.3. Przebieg badań

- Próbkę poddawane były obciążeniu w trzech środowiskach; w środowisku powietrza, wody morskiej oraz wody morskiej pod wpływem polaryzacji.
- Próby realizowano w środowiskach powietrza oraz samej wody morskiej wykonywane były celem początkowego oszacowania różnic wpływu tych środowisk na proces, które okazały się znikome.
- Właściwe badania były przeprowadzane w środowisku zastępczej wody morskiej typu A oraz polaryzacji. Wartość polaryzacji mająca najsilniejszy wpływ na próbki została określona na 5 mA/cm^2 .
- Badania metodą Constant Load przeprowadzane były zgodnie z ogólnymi wytycznymi normy PN-EN ISO 7539-1, dotyczącej badań korozji naprężeniowej.
- Próbkę zamocowaną na stanowisku poddawana była stałemu obciążeniu. Jeżeli czas do zniszczenia próbki przy danym obciążeniu był krótszy od 200 godzin, wynik próby zostawał definiowany jako negatywny.
- Wartość 200 godzin została przyjęta zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 2832, która dotyczy badań próbek z karbem. Mówi ona, że niedopuszczalne jest zerwanie próbki przed czasem krótszym niż wyżej wymieniony [17].
- Jeżeli próba była niezadowalająca, koniecznym było zmniejszenie obciążenia i testowanie kolejnych próbek do momentu, kiedy próbka wytrzyma 200 lub więcej godzin. Wówczas wynik próby wstępnie był określany jako pozytywny.
- Aby próba definitywnie mogła zostać uznana za pozytywną, musiała być przeprowadzona dla danego obciążenia trzykrotnie, za każdym razem z wytrzymałością co najmniej 200 godzin.
- Wyniki badań zostały przedstawione tabelarycznie (tablica 2). Oprócz danych wejściowych tablica zawiera czas do zerwania poszczególnych próbek określony w godzinach oraz kolumnę podsumowującą czy dana próbka uległa pęknięciu czy też nie (1-tak, 0-nie).

12.4. Tabela wyników

Tablica 2: Wyniki badań próbek ze stali superdupleks UR 52N+ metodą stałego obciążenia

Próbka	Energia liniowa spawania[kJ/cm]	Natężenie prądu spawania [A]	Napięcie łuku [V]	Prędkość spawania [mm/s]	Obciążenie [%]	Siła zastosowana [kN]	Czas do zerwania [h]	Pęknięcie	D1	D2	Obszar złącza
1	0,98	174	23,8	3,8	0,75	13,18	1,75	1	0	1	S
2	0,98	174	23,8	3,8	0,7	12,25	5,65	1	0	1	S
3	0,98	174	23,8	3,8	0,65	11,37	5	1	0	1	S
4	0,98	174	23,8	3,8	0,6	10,5	200	0	0	1	S
5	0,98	174	23,8	3,8	0,65	11,37	200	0	0	1	S
6	0,98	174	23,8	3,8	0,7	12,25	1,3	1	0	1	S
7	0,98	174	23,8	3,8	0,65	11,37	120,35	1	0	1	S
8	0,98	174	23,8	3,8	0,65	11,37	200	0	0	1	S
9	2,13	470	29,5	6,5	0,65	10,63	200	0	0	1	S
10	2,13	470	29,5	6,5	0,75	12,25	1,4	1	0	1	S
11	2,13	470	29,5	6,5	0,7	11,41	66,58	1	0	1	S
12	2,13	470	29,5	6,5	0,7	11,41	16,1	1	0	1	S
13	2,13	470	29,5	6,5	0,65	10,63	200	0	0	1	S
14	0	0	0	0	1	16,33	0,1	1	0	0	MR
15	0	0	0	0	0,8	12,95	12	1	0	0	MR
16	0	0	0	0	0,7	11,44	200	0	0	0	MR
17	0	0	0	0	0,75	12,25	200	0	0	0	MR
18	0	0	0	0	0,85	13,87	1,05	1	0	0	MR
19	0	0	0	0	0,8	12,95	44,7	1	0	0	MR
20	0	0	0	0	0,75	12,25	144,7	1	0	0	MR
21	0,98	174	23,8	3,8	0,7	11,94	200	0	1	0	SWC
22	0,98	174	23,8	3,8	0,75	12,83	200	0	1	0	SWC
23	0,98	174	23,8	3,8	0,8	13,68	12,9	1	1	0	SWC
24	0,98	174	23,8	3,8	0,75	12,83	85	1	1	0	SWC
25	0,98	174	23,8	3,8	0,75	12,83	69,5	1	1	0	SWC
26	0,98	174	23,8	3,8	0,7	11,94	200	0	1	0	SWC
27	2,13	470	29,5	6,5	0,7	11,47	200	0	1	0	SWC
28	2,13	470	29,5	6,5	0,75	12,29	10,8	1	1	0	SWC
29	2,13	470	29,5	6,5	0,7	11,47	200	0	1	0	SWC
30	2,13	470	29,5	6,5	0,75	12,29	200	0	1	0	SWC
31	2,13	470	29,5	6,5	0,75	12,29	13,4	1	1	0	SWC

13. Analiza modeli dla czynników ilościowych

Po zestawieniu wyników następnym krokiem była ich właściwa interpretacja. Wyniki z tablicy 2 zostały wprowadzone do programu Statistica w celu tworzenia różnych modeli graficznych dla analizy wartości. Analizy statystyczne przeprowadzono z wstępnie przyjętym poziomem istotności $\alpha = 0,05$. Ilość modeli umieszczonych w pracy jest duża, jednakże ilość samych modeli wygenerowanych była znacznie większa. Wynika to z faktu, że nie wszystkie modele przedstawiały pożądane efekty i nie wszystkie były zadowalające. Czynnikiem wejściowym do analiz bieżącego rozdziału były: energia liniowa, siła zastosowana i obciążenie, natomiast jako czynnik wyjściowy przyjęto czas do zerwania.

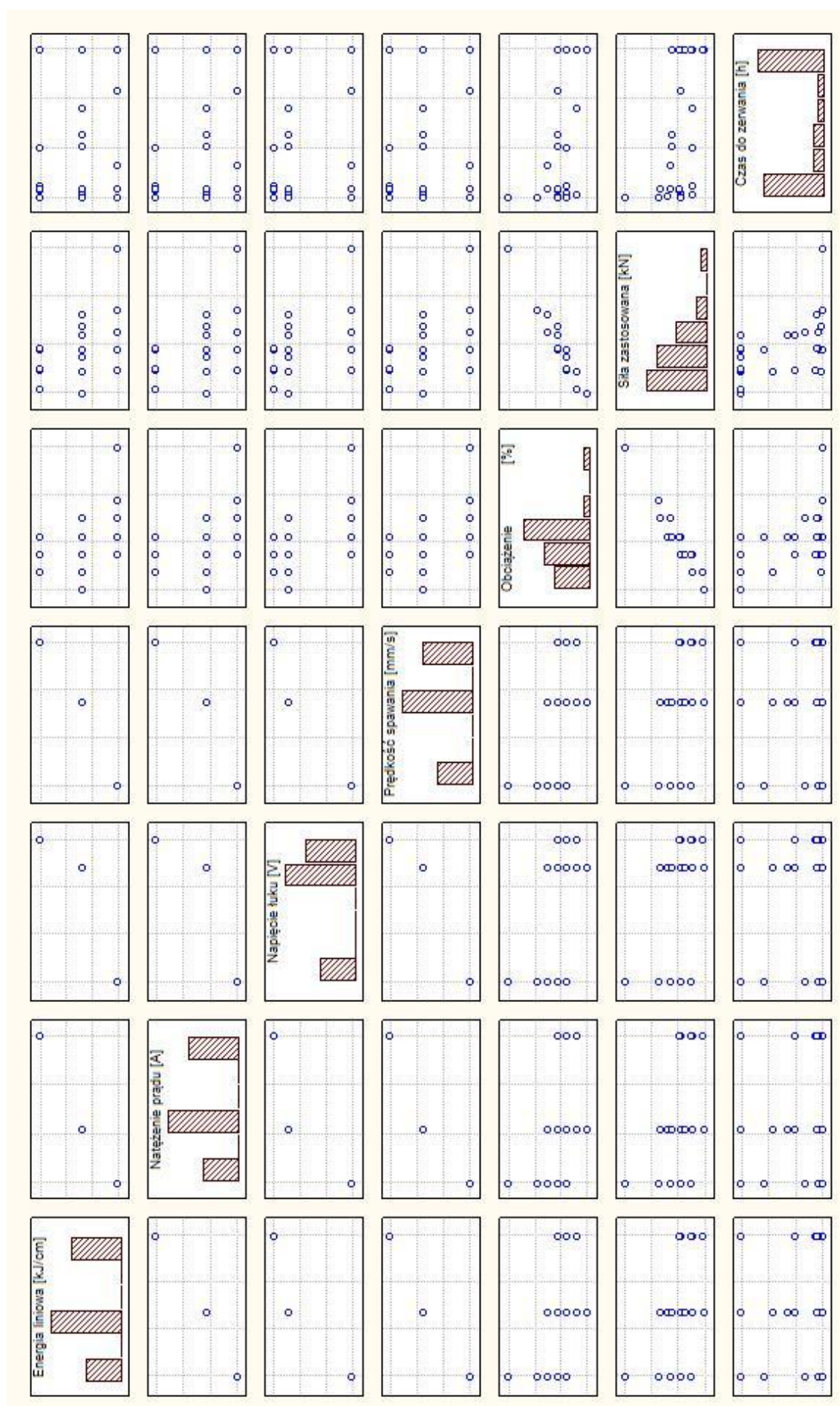
Analizy rozpoczęto od sporządzenia macierzy korelacji (tablica 3) danych z tablicy 2

Tablica 3: Współczynniki korelacji poszczególnych zmiennych

	Średnia	Odch.std	Energia liniowa [kJ/cm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Prędkość spawania [mm/s]	Obciążenie [%]	Siła zastosowana [kN]	Czas do zerwania [h]
Energia liniowa [kJ/cm]	1,1297	0,8011	1,000000	0,993265	0,894617	0,985875	-0,414007	-0,482027	0,094150
Natężenie prądu [A]	230,1935	181,6776	0,993265	1,000000	0,836817	0,959828	-0,363206	-0,462545	0,087228
Napięcie łuku [V]	20,2645	11,4054	0,894617	0,836817	1,000000	0,956818	-0,555531	-0,493837	0,108477
Prędkość spawania [mm/s]	3,8129	2,4081	0,985875	0,959828	0,956818	1,000000	-0,477559	-0,498685	0,101909
Obciążenie [%]	0,7274	0,0751	-0,414007	-0,363206	-0,555531	-0,477559	1,000000	0,955764	-0,498527
Siła zastosowana [kN]	12,1900	1,1394	-0,482027	-0,462545	-0,493837	-0,498685	0,955764	1,000000	-0,540261
Czas do zerwania [h]	103,6219	89,8102	0,094150	0,087228	0,108477	0,101909	-0,498527	-0,540261	1,000000

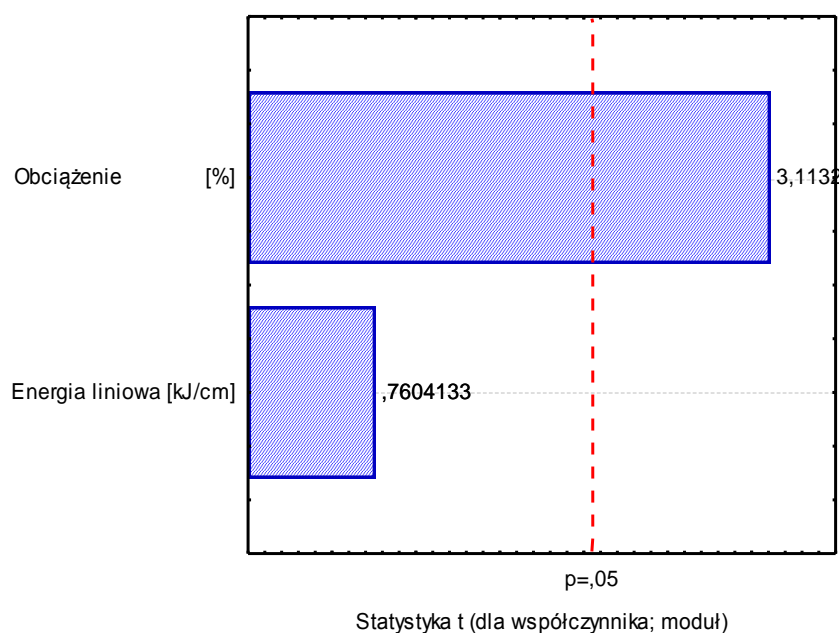
Jak widać, w komórkach dotyczących tych samych czynników, wartość współczynników korelacji wynosi 1. W pozostałych natomiast wartości mieszczą się w zbiorze $(-1;0) \cup (0;1)$. Można zauważyć, że wartości natężenia prądu, napięcia łuku i prędkości spawania względem energii liniowej są najwyższe z występujących, jednakże jest to oczywiste, gdyż na ich podstawie wyliczana jest wartość energii liniowej. Dodatnie współczynniki korelacji oznaczają wpływ wprost proporcjonalny, natomiast ujemne – odwrotnie proporcjonalny.

Z tablicy 3 wynika, że istnieją statystycznie istotne korelacje między obciążeniem i zastosowaną siłą a czasem do zerwania. Wniosek ten znajdzie potwierdzenie na kwadratowym wykresie macierzowym pokazanym na rys.16.



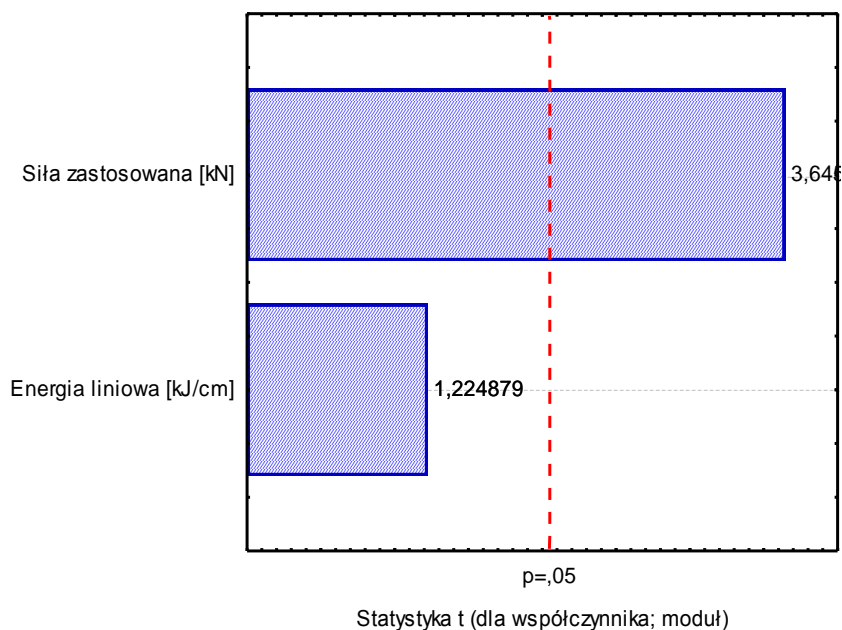
Rys. 16 Wykres macierzowy korelacji

Na rys. 17 i 18 w postaci wykresów Pareto pokazane są istotności czynników objaśniających względem czynnika objaśnianego, jakim jest czas do zerwania próbki. Czynniki objaśniające są ukazane w dwóch osobnych zespołach: obciążenie i energia liniowa oraz siła zastosowana i energia liniowa. Gdyby na wykresie Pareto zostały ukazane razem wszystkie trzy czynniki, wtedy żaden z nich nie osiągnąłby poziomu istotności p. Ten fakt tłumaczy zbyt wysoka wartość korelacji siły zastosowanej względem czasu do zerwania oraz obciążenia względem czasu do zerwania.



Rys. 17 Istotność obciążenia i energii liniowej dla czasu do zerwania

Z wykresu na rys. 17 wynika, że energia liniowa jest czynnikiem, który można pominąć w dalszych analizach, ponieważ jest statystycznie nieistotna.



Rys. 18 Istotność siły zastosowanej i energii liniowej dla czasu do zerwania

Zgodnie z wykresem Pareto na rys. 18 energia liniowa także nie osiąga poziomu istotności p. Sprawia to tym samym, że czynniki takie jak natężenie prądu spawania, napięcie łuku oraz prędkość spawania są również nieistotne ze względu to, że są to składowe energii liniowej. Odrzucenie energii liniowej zarówno w jednym jak i drugim przypadku sprawia, że tylko jeden czynnik jest istotny, zatem dalsza analiza statystyczna opierać się będzie na regresji prostej. Należy jednak podkreślić, że ilość czynników branych pod uwagę przy tworzeniu modeli znacznie wpływa na ich jakość, niestety zatem modele oparte na jednej zmiennej nie będą zadowalające.

13.1. Czas do zerwania względem obciążenia (model I)

Tablica 4: Oceny parametrów, Parametryzacja z sigma-ograniczeniami (model I)

	Czas do zerwania [h] Param.	Czas do zerwania [h] Bł.std.	Czas do zerwania [h] t	Czas do zerwania [h] p	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.	Czas do zerwania [h] Beta	Czas do zerwania [h] Beta std.	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.
Wyraz wolny	537,301	140,7553	3,81727	0,000656	249,424	825,178				
Obciążenie [%]	-596,188	192,5093	-3,09693	0,004311	-989,914	-202,462	-0,498527	0,160975	-0,827757	-0,169297

Tablica 5: Test SS dla pełnego modelu względem SS dla reszt (model I)

	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
Czas do zerwania [h]	0,498527	0,248529	0,222616	60138,16	1	60138,16	181838,2	29	6270,282	9,590980	0,004311

Równanie prognozy dla: „Czas do zerwania [h]”

Model I: $t_z = 537,3 - 596,2 * Ob$

gdzie: t_z – czas do zerwania [h],

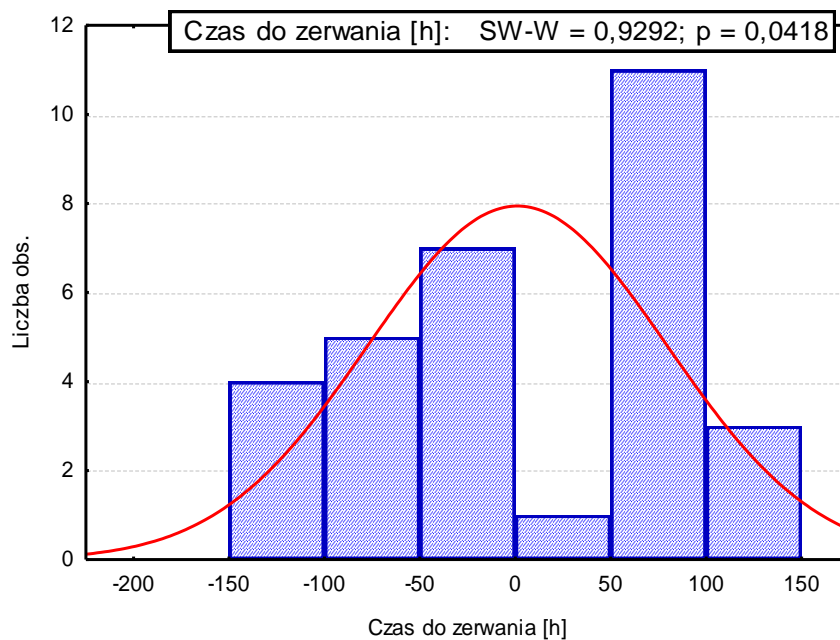
Ob – obciążenie [%].

Równanie utworzone zostało z wykorzystaniem danych otrzymanych w modelu ukazanym na tablicy 4. Widniejące w pierwszej kolumnie parametry – wyraz wolny oraz obciążenie – zostały zaokrąglone i podstawione do równania liniowego. Równanie jest statystycznie istotne, ale charakteryzuje się niskimi wartościami współczynników dopasowania modelu do wyników eksperymentu (tablica 4).

Tablica 6: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty (model I)

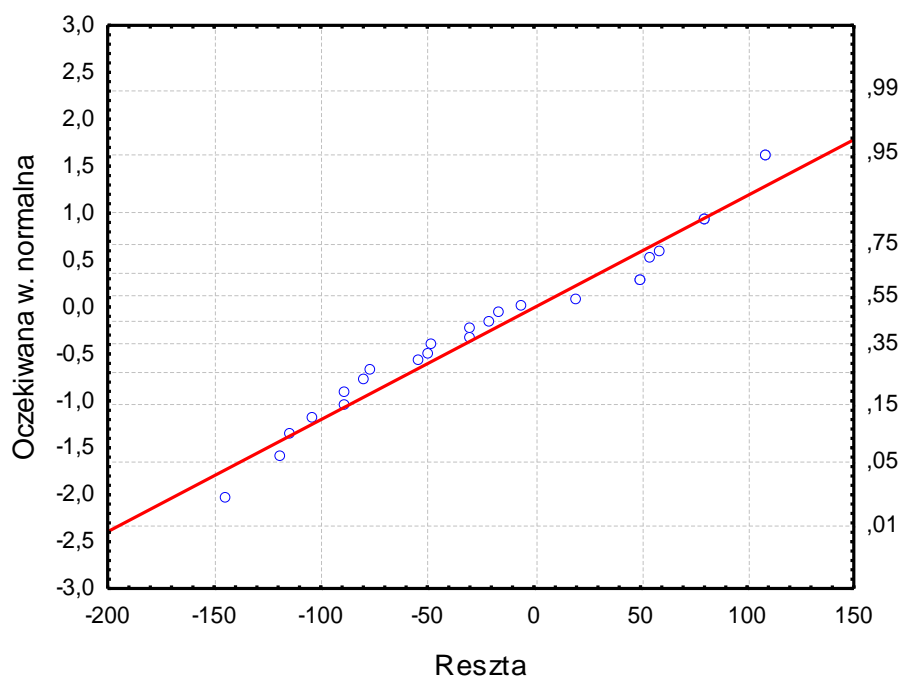
Nr	Czas do zerwania [h] Obserw.	Czas do zerwania [h] Przewid.	Czas do zerwania [h] Reszty
1	1,7500	90,1596	-88,410
2	5,6500	119,9690	-114,319
3	5,0000	149,7784	-144,778
4	200,0000	179,5878	20,412
5	200,0000	149,7784	50,222
6	1,3000	119,9690	-118,669
7	120,3500	149,7784	-29,428
8	200,0000	149,7784	50,222
9	200,0000	149,7784	50,222
10	1,4000	90,1596	-88,760
11	66,5800	119,9690	-53,389
12	16,1000	119,9690	-103,869
13	200,0000	149,7784	50,222
14	0,1000	-58,8873	58,987
15	12,0000	60,3502	-48,350
16	200,0000	119,9690	80,031
17	200,0000	90,1596	109,840
18	1,0500	30,5408	-29,491
19	44,7000	60,3502	-15,650
20	144,7000	90,1596	54,540
21	200,0000	119,9690	80,031
22	200,0000	90,1596	109,840
23	12,9000	60,3502	-47,450
24	85,0000	90,1596	-5,160
25	69,5000	90,1596	-20,660
26	200,0000	119,9690	80,031
27	200,0000	119,9690	80,031
28	10,8000	90,1596	-79,360
29	200,0000	119,9690	80,031
30	200,0000	90,1596	109,840
31	13,4000	90,1596	-76,760

Warunkiem poprawności modelu matematycznego jest zgodność reszt surowych modelu z rozkładem normalnym [21]. W tablicy 6 przedstawiono dane oraz wyniki obliczenia wartości reszt surowych. Wartości przewidywane są odejmowane od wartości obserwowanych. Z tego powodu reszty mogą być dodatnie lub ujemne. Najlepiej taką tabelę interpretuje się w sposób graficzny, wykonując histogram i test Shapiro – Wilka, który ukazuje przedziały wartości reszt i ilość przypadków kwalifikujących się do konkretnych przedziałów.



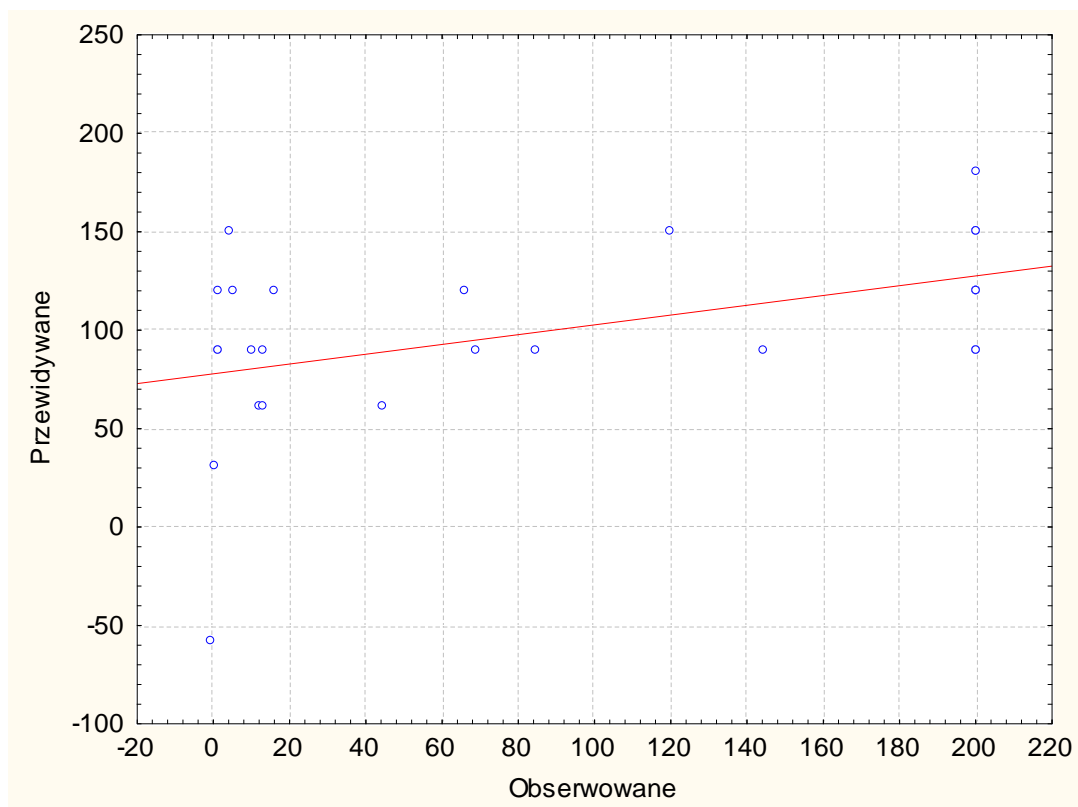
Rys. 19 Histogram czasu do zerwania (model I)

Histogram z rys. 19 pod względem graficznym może wydawać się zadowalający, jednak z testu Shapiro – Wilka wynika, że poziom $p = 0,0418$ jest mniejszy od wymaganego $p = 0,05$, żeby rozkład reszt był normalny. Taką sytuację opisuje się stwierdzeniem, że model nie jest poprawny matematycznie.



Rys. 20 Wykres normalności reszt (model I)

Wykres normalności reszt jest dodatkową metodą weryfikacji spełnienia założenia o normalności reszt. Jak widać na rys. 20 punkty reszt surowych w dużej ilości odstają od linii oznaczającej rozkład normalny. Jest to zatem wykres, który potwierdza wcześniej występujący histogram w stwierdzeniu, że rozkład reszt nie jest poprawny.



Rys. 21 Wartości obserwowane względem przewidywanych (model I)

Na wygenerowanym wykresie wartości obserwowanych względem przewidywanych doskonale widać punkt, który znacząco odstaje od pozostałych. Wpływa przez to negatywnie na linię trendu. Porównując współrzędne z tablicy 6 do wykresu na rys. 21, możliwe jest określenie, która próbka tak znacznie odchodzi od trendu. Okazuje się, że jest to próbka, na której ustalane było początkowe obciążenie podczas badań (obciążenie w tym wypadku wynosiło 1). W takich okolicznościach uzasadnioną decyzją jest usunięcie tego punktu z tabeli (punkt nr 14) i dalsza analiza na zbiorze skorygowanym.

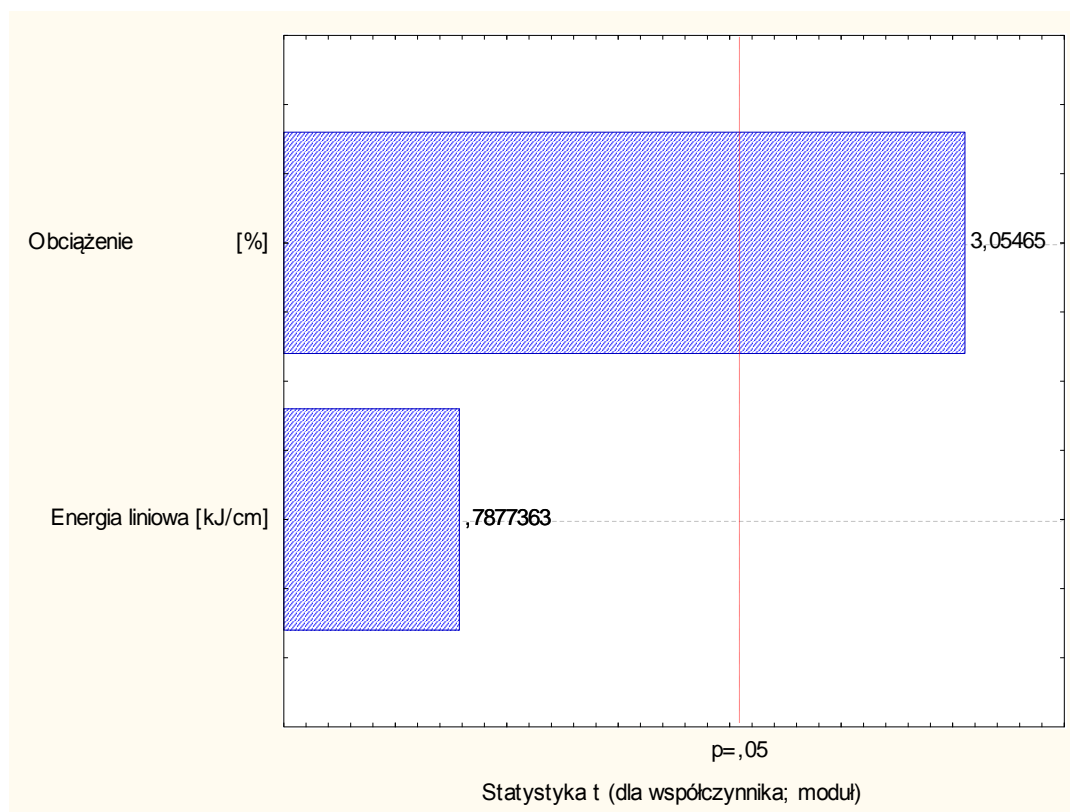
Oczywiście, konieczne będzie w tym wypadku ponowne wygenerowanie macierzy korelacji (tablica 7) oraz wykonanie wszystkich dotychczas analizowanych modeli w celu sprawdzenia czy nie zmienia to istotności czynników objaśniających. Jest to także możliwość porównania jak zmieniają się graficznie wykresy oraz wartościowo tabele na skutek uaktualnienia tabeli danych.

Tablica 7: Skorygowana macierz korelacji (model II)

	Średnia	Odch.std	Energia liniowa [kJ/cm]	Natężenie prądu [A]	Napięcie łuku [V]	Prędkość spawania [mm/s]	Obciążenie [%]	Siła zastosowana [kN]	Czas do zerwania [h]
Energia liniowa [kJ/cm]	1,1673	0,7864	1,000000	0,993221	0,887126	0,985296	-0,333250	-0,428723	0,040478
Natężenie prądu [A]	237,8667	179,6018	0,993221	1,000000	0,827463	0,958755	-0,285100	-0,423527	0,038888
Napięcie łuku [V]	20,9400	10,9515	0,887126	0,827463	1,000000	0,952938	-0,477837	-0,389421	0,041134
Prędkość spawania [mm/s]	3,9400	2,3412	0,985296	0,958755	0,952938	1,000000	-0,395801	-0,425784	0,041817
Obciążenie [%]	0,7183	0,0565	-0,333250	-0,285100	-0,477837	-0,395801	1,000000	0,918944	-0,490914
Siła zastosowana [kN]	12,0520	0,8558	-0,428723	-0,423527	-0,389421	-0,425784	0,918944	1,000000	-0,548990
Czas do zerwania [h]	107,0727	89,2309	0,040478	0,038888	0,041134	0,041817	-0,490914	-0,548990	1,000000

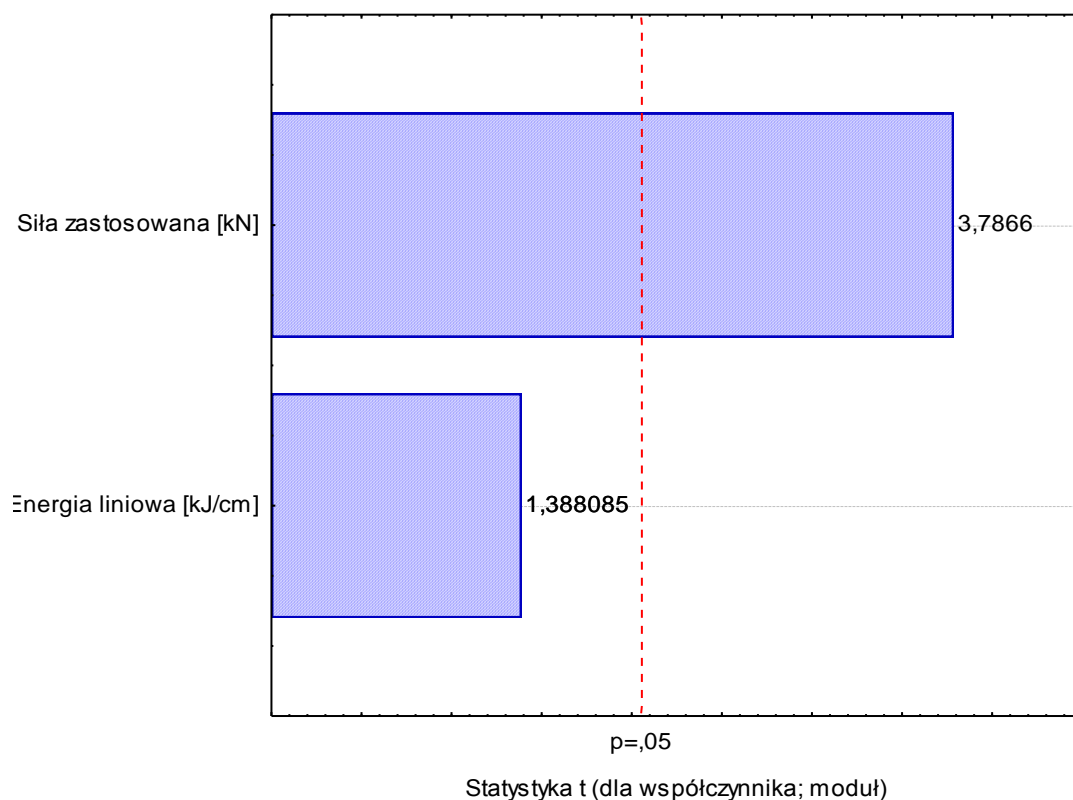
Porównując skorygowaną macierz korelacji do początkowej macierzy korelacji można stwierdzić, że usunięcie jednego punktu znacznie zmieniło wartości korelacji zarówno obciążenia a także siły zastosowanej względem energii liniowej i jej składowych.

Rys. 22 przedstawia wykres Pareto obciążenia i energii liniowej dla zmienionych danych.



Rys. 22 Istotność obciążenia i energii liniowej dla czasu do zerwania (model II)

Wartość energii liniowej kosztem obciążenia wzrosła, jednakże mimo zmian w dalszym ciągu energia liniowa jest czynnikiem statystycznie nieistotnym. Na rys. 23 ukazane są istotności siły zastosowanej oraz energii liniowej.



Rys. 23 Istotność siły zastosowanej i energii liniowej dla czasu do zerwania (model III)

Na wykresie Pareto z uwzględnieniem siły zastosowanej oraz energii liniowej istotność obu czynników wzrosła, jednakże energia liniowa, podobnie jak w zestawieniu z obciążeniem, dalej ma za mały wpływ na czas do zniszczenia, żeby posłużyć się regresją wieloraką.

13.2. Czas do zerwania względem obciążenia – skorygowany (model II)

Tablica 8: Oceny parametrów (model II)

	Czas do zerwania [h] Param.	Czas do zerwania [h] Bł.std.	Czas do zerwania [h] t	Czas do zerwania [h] p	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.	Czas do zerwania [h] Beta	Czas do zerwania [h] Beta std.	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.
Wyraz wolny	664,477	187,4996	3,54388	0,001406	280,40	1048,553				
Obciążenie [%]	-775,969	260,2447	-2,98169	0,005877	-1309,06	-242,882	-0,490914	0,164643	-0,828170	-0,153658

Tablica 9: Test SS dla pełnego modelu względem SS dla reszt (model II)

	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
Czas do zerwania [h]	0,490914	0,240996	0,213889	55646,65	1	55646,65	175255,7	28	6259,131	8,890475	0,005877

Równanie prognozy dla: „Czas do zerwania [h]”

Model II: $tz = 664,5 - 776,0 * Ob$

gdzie: tz – czas do zerwania [h],

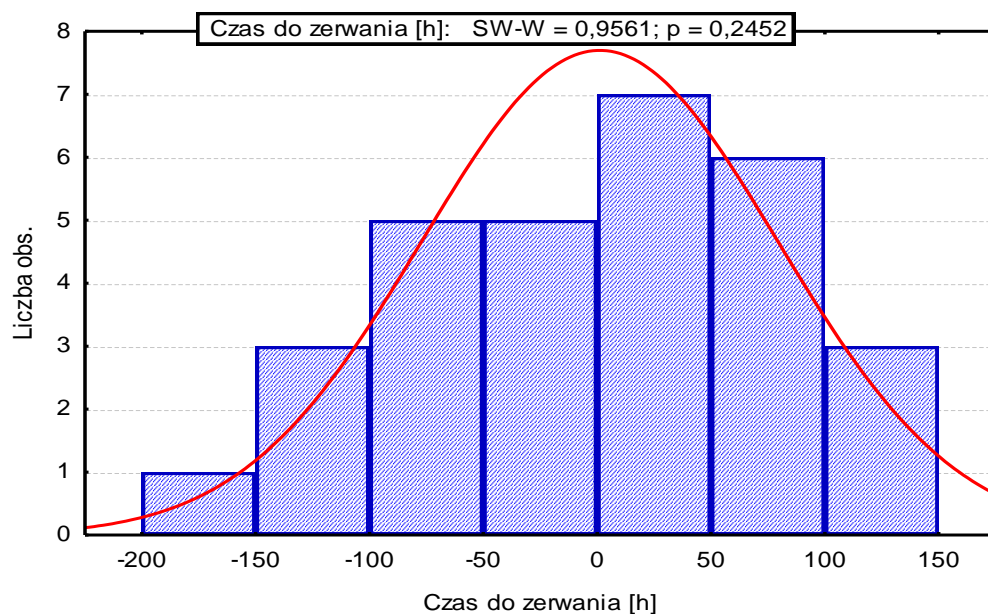
Ob – obciążenie [%].

Równanie utworzone zostało z wykorzystaniem danych otrzymanych w modelu ukazanym na tablicy 8. Widniejące w pierwszej kolumnie parametry – wyraz wolny oraz obciążenie – zostały zaokrąglone i podstawione do równania liniowego. Podobnie jak dla modelu I, równanie jest statystycznie istotne, obciążenie charakteryzuje się niskimi wartościami współczynników dopasowania modelu do wyników eksperymentu (tablica 8).

Tablica 10: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty (model II)

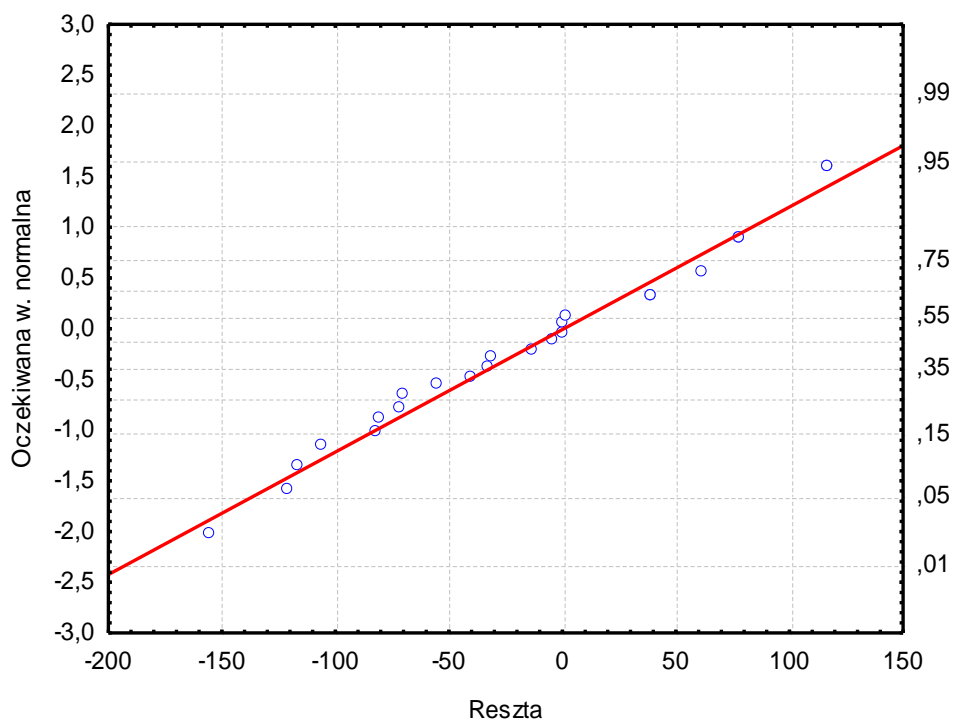
Nr	Czas do zerwania [h] Obserw.	Czas do zerwania [h] Przewid.	Czas do zerwania [h] Reszty
1	1,7500	82,5003	-80,750
2	5,6500	121,2988	-115,649
3	5,0000	160,0972	-155,097
4	200,0000	198,8957	1,104
5	200,0000	160,0972	39,903
6	1,3000	121,2988	-119,999
7	120,3500	160,0972	-39,747
8	200,0000	160,0972	39,903
9	200,0000	160,0972	39,903
10	1,4000	82,5003	-81,100
11	66,5800	121,2988	-54,719
12	16,1000	121,2988	-105,199
13	200,0000	160,0972	39,903
14	12,0000	43,7019	-31,702
15	200,0000	121,2988	78,701
16	200,0000	82,5003	117,500
17	1,0500	4,9034	-3,853
18	44,7000	43,7019	0,998
19	144,7000	82,5003	62,200
20	200,0000	121,2988	78,701
21	200,0000	82,5003	117,500
22	12,9000	43,7019	-30,802
23	85,0000	82,5003	2,500
24	69,5000	82,5003	-13,000
25	200,0000	121,2988	78,701
26	200,0000	121,2988	78,701
27	10,8000	82,5003	-71,700
28	200,0000	121,2988	78,701
29	200,0000	82,5003	117,500
30	13,4000	82,5003	-69,100

Wartości obserwowane są niezmiennie, natomiast porównując obecne wartości przewidywane z wartościami z tablicy 6, widoczne są zmiany. Rzuć to oczywiście odmiennymi resztami, które mogą dać inny wynik testu Shapiro – Wilka. Rys. 24 przedstawia skorygowany histogram reszt.



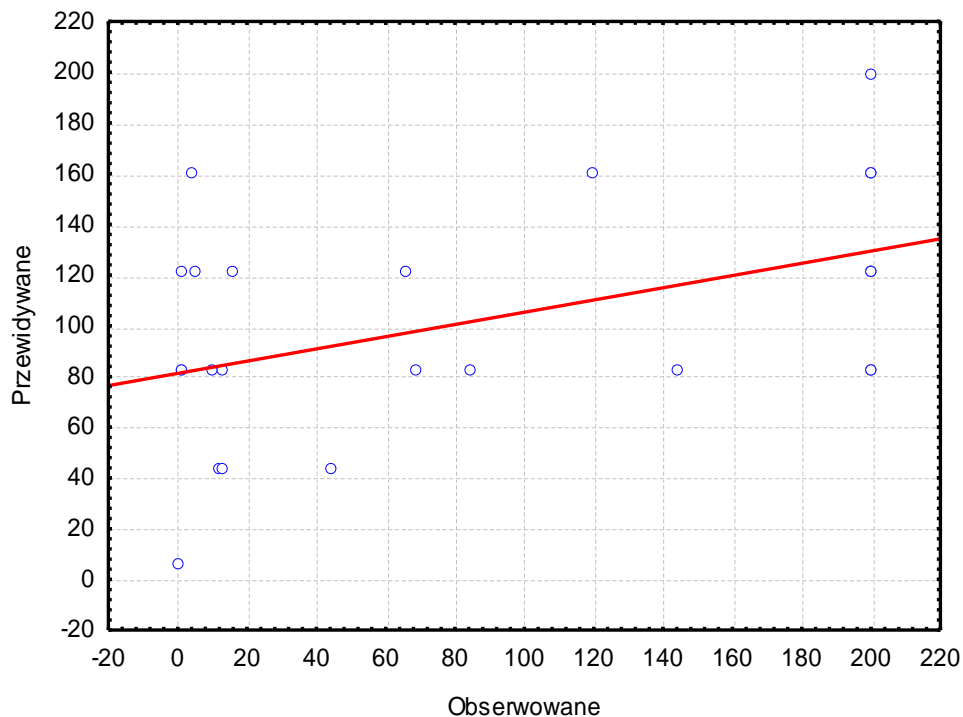
Rys. 24 Skorygowany histogram czasu do zerwania (model II)

Aktualny histogram reszt jest nie tylko estetyczny, ale także zgodny z normalnym. Test Shapiro – Wilka wykazał poziom $p = 0,2452$, co jest niemal sześciokrotnie większą wartością od wartości przed aktualizacją danych.



Rys. 25 Skorygowany wykres normalności reszt (model II)

Ponownie wygenerowany wykres normalności reszt ma znacznie więcej punktów stykających linią rozkładu normalnego, a odległości punktów odstających jest mniejsza niż na rys. 20. Można na jego podstawie ocenić rozkład reszt jako zgodny z rozkładem normalnym.



Rys. 26 Skorygowany wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych (model II)

Po usunięciu odstającego punktu, nowy wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych wygląda dużo lepiej. Co prawda rozkład punktów na wykresie jest podobny do sytuacji na rys.21, jednakże skala zmniejszona została z 50 do 20.

13.3. Czas do zerwania względem siły zastosowanej (model III)

Tablica 11: Oceny parametrów (model III)

	Czas do zerwania [h] Param.	Czas do zerwania [h] Bł.std.	Czas do zerwania [h] t	Czas do zerwania [h] p	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.	Czas do zerwania [h] Beta	Czas do zerwania [h] Beta std.	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.
Wyraz wolny	796,9758	198,9839	4,00523	0,000414	389,3756	1204,576				
Siła zastosowana [kN]	-57,2439	16,4704	-3,47557	0,001680	-90,9819	-23,506	-0,548990	0,157957	-0,872550	-0,225430

Tablica 12: Test SS dla pełnego modelu względem SS dla reszt (model III)

	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
Czas do zerwania [h]	0,548990	0,301390	0,276439	69591,60	1	69591,60	161310,7	28	5761,097	12,07957	0,001680

Równanie prognozy dla: „Czas do zerwania [h]”

Model III: $t_z = 797,0 - 57,2 \cdot F_z$

gdzie: t_z – czas do zerwania [h],

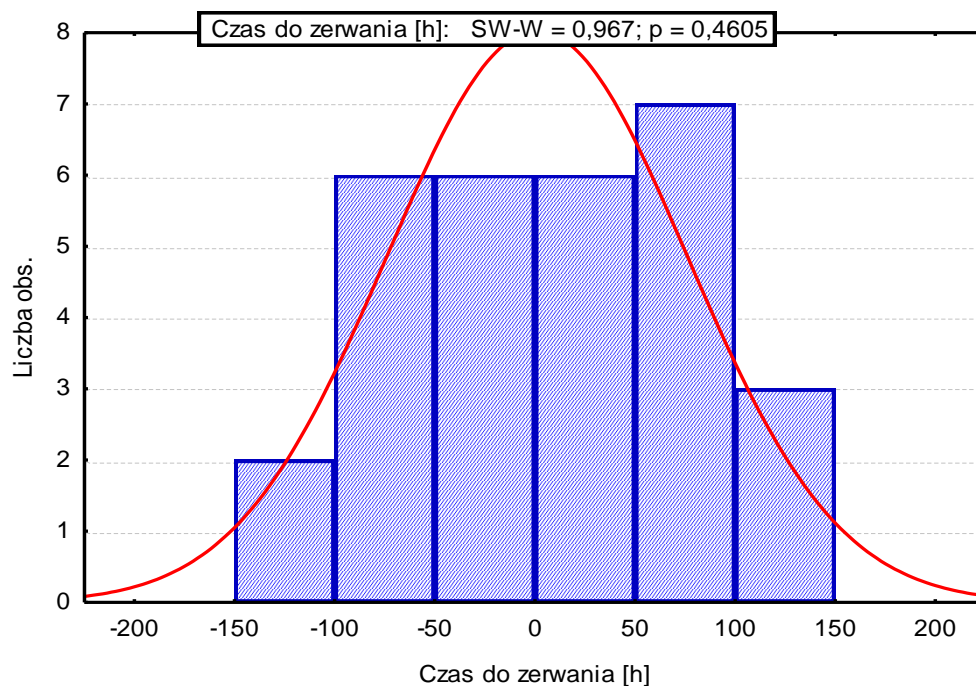
F_z – siła zastosowana [kN].

Równanie utworzone zostało z wykorzystaniem danych otrzymanych w modelu ukazanym na tablicy 11. Widniejące w pierwszej kolumnie parametry – wyraz wolny oraz siła zastosowana – zostały zaokrąglone i podstawione do równania liniowego. Równanie jest statystycznie istotne, siła zastosowana charakteryzuje się większymi od obciążenia wartościami współczynników dopasowania modelu do wyników eksperymentu.

Tablica 13: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty (model III)

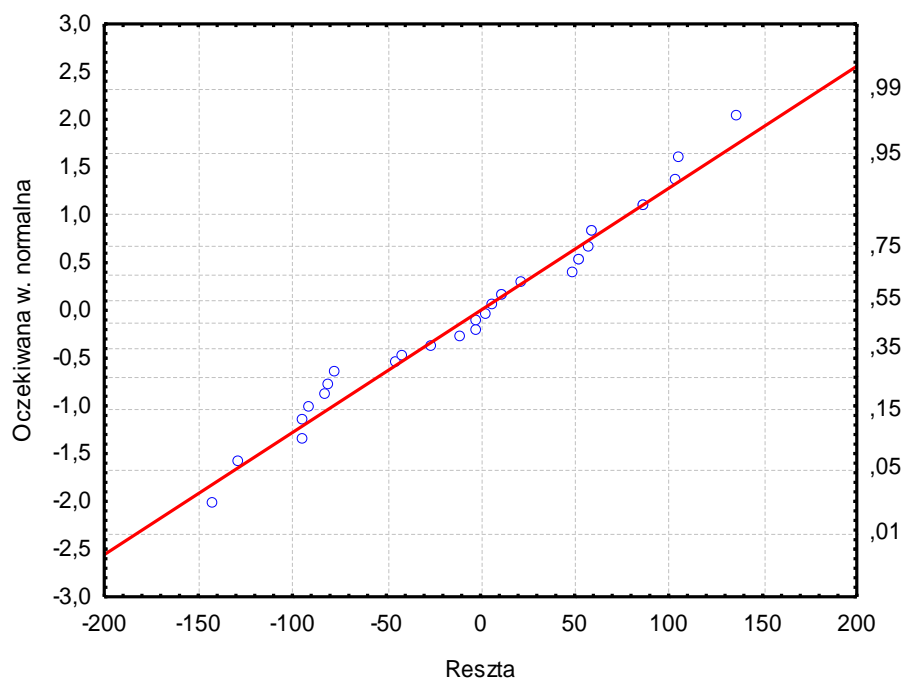
Nr			
	Czas do zerwania [h] Obserw.	Czas do zerwania [h] Przewid.	Czas do zerwania [h] Reszty
1	1,7500	42,5016	-40,752
2	5,6500	95,7384	-90,088
3	5,0000	146,1130	-141,113
4	200,0000	195,9152	4,085
5	200,0000	146,1130	53,887
6	1,3000	95,7384	-94,438
7	120,3500	146,1130	-25,763
8	200,0000	146,1130	53,887
9	200,0000	188,4734	11,527
10	1,4000	95,7384	-94,338
11	66,5800	143,8232	-77,243
12	16,1000	143,8232	-127,723
13	200,0000	188,4734	11,527
14	12,0000	55,6677	-43,668
15	200,0000	142,1059	57,894
16	200,0000	95,7384	104,262
17	1,0500	3,0033	-1,953
18	44,7000	55,6677	-10,968
19	144,7000	95,7384	48,962
20	200,0000	113,4840	86,516
21	200,0000	62,5369	137,463
22	12,9000	13,8796	-0,980
23	85,0000	62,5369	22,463
24	69,5000	62,5369	6,963
25	200,0000	113,4840	86,516
26	200,0000	140,3886	59,611
27	10,8000	93,4486	-82,649
28	200,0000	140,3886	59,611
29	200,0000	93,4486	106,551
30	13,4000	93,4486	-80,049

Tablica 13 ukazuje wartości przewidywane, obserwowane oraz reszty dla przypadku uwzględniającego siłę zastosowaną. Przedstawione w tablicy dane zostały przedstawione w formie histogramu na rys. 27



Rys. 27 Histogram czasu do zerwania (model III)

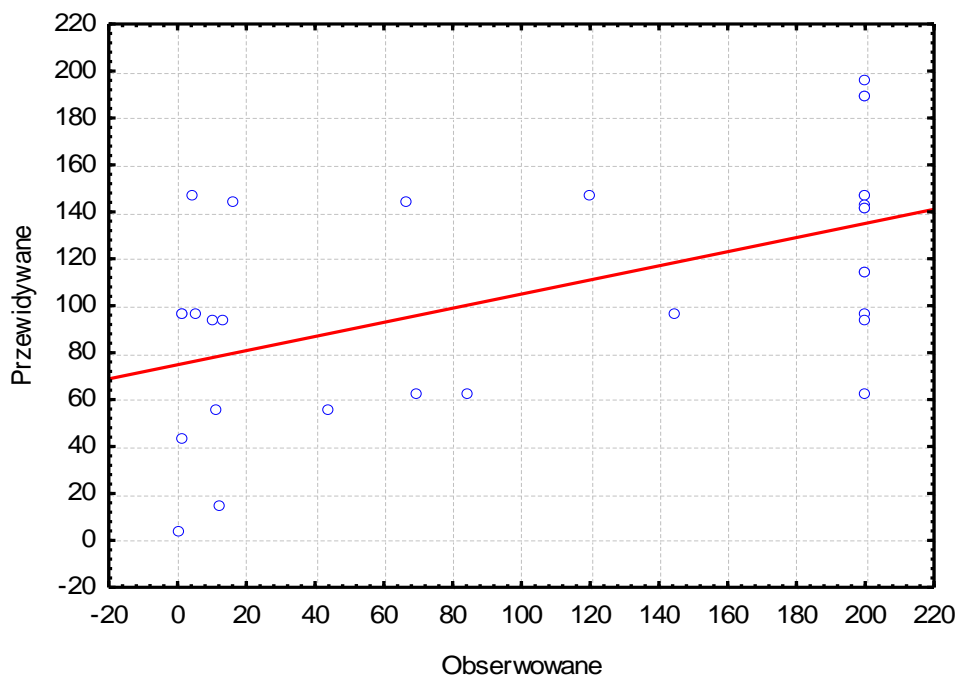
Histogram reszt wygenerowany na podstawie siły zastosowanej jako czynnika objaśniającego jest znacznie lepszy od histogramu na bazie obciążenia. Na powyższym wykresie wartości reszt mieszczą się w zbiorze $(-150; 150)$, gdzie dla histogramu z rys. 24 potrzebny był obszar $(-200; 150)$. Poziom $p = 0,4605$ znacznie przekracza poziom istotności, model jest poprawny matematycznie.



Rys. 28 Wykres normalności reszt (model III)

Wykres normalności reszt na rys. 28, mimo pozytywnego modelu histogramu reszt, nie jest dobry. Widać sporo punktów odstających od rozkładu normalnego, a po dokładniejszej obserwacji w rozrzucie tych punktów można zauważyć sinusoidalność względem linii.

Na rys. 29 pokazano zależność między wartościami przewidywanymi opracowanego modelu III a wartościami obserwowanymi.



Rys. 29 Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych (model III)

14. Analiza modeli dla czynników ilościowych oraz obszarów występowania pęknięć

W obecnym rozdziale jako dodatkowe czynniki wejściowe będą uwzględniane obszary występowania pęknięć (spoina, strefa wpływu ciepła i materiał rodzimy). Żeby określić wpływ, jaki miało znajdowanie się karbu w poszczególnych strefach, za pomocą programu Statistica, konieczne było wykonanie zabiegu kodowania. Kodowanie przeprowadzono zgodnie z konwencją podaną w tablicy 14.

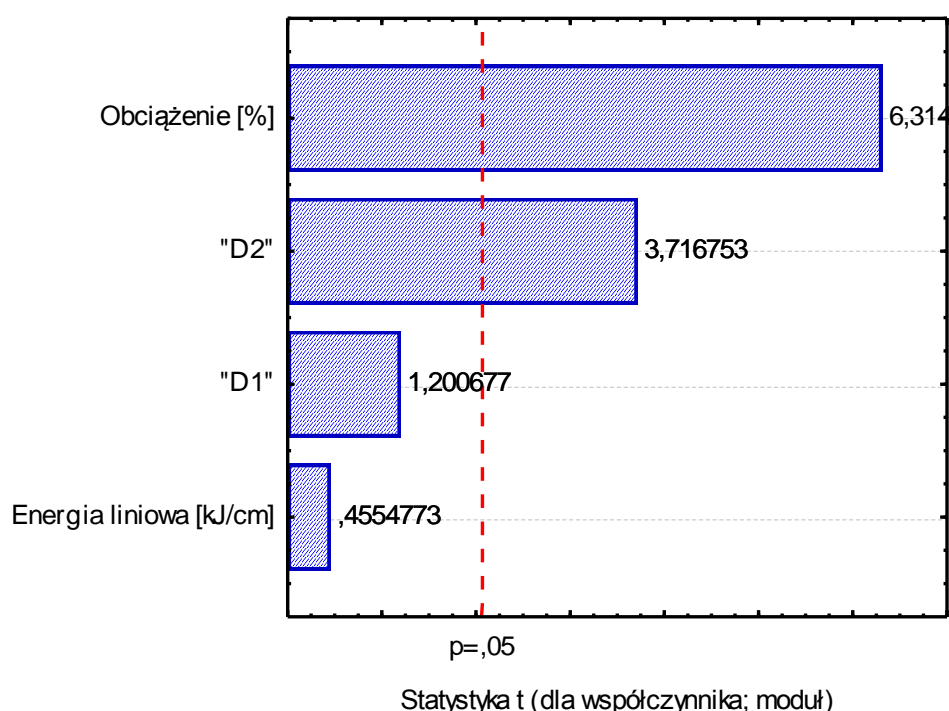
Tablica 14: Konwencja kodowania obszarów złącza

D1	D2	Obszar złącza
0	1	Spoina
0	0	Materiał rodzimy
1	0	SWC

Dzięki takiemu rozwiązaniu można opracować model regresji uwzględniający względny wpływ spoiny i strefy wpływu ciepła na wielkość wynikową w porównaniu do materiału rodzimego.

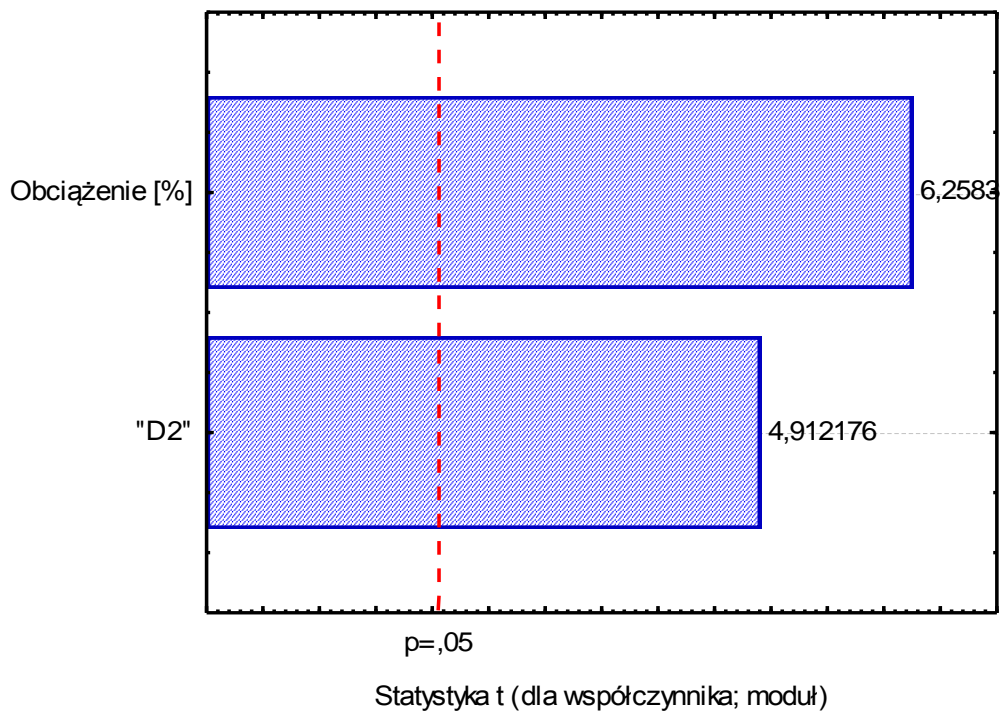
14.1. Czas do zerwania względem obciążenia i obszaru D2 (model IV)

W dalszych analizach rodzaje modeli będą takie same jak dotychczas, jednak istnieje możliwość uzyskania większej ilości czynników istotnych statystycznie, co pozwoliłoby na utworzenie modeli o większej jakości (regresja wieloraka). Wszystko jednak zależy od wykresu Pareto przedstawionego na rys. 30



Rys. 30 Istotność obciążenia, energii liniowej oraz obszarów względem czasu do zerwania

Wykres na rys. 30 zakwalifikował jako statystycznie istotne dwa czynniki: obciążenie oraz D2 – strefę spoiny. Energia liniowa pozostaje nadal czynnikiem nieistotnym. Żeby uzyskać większą dokładność, należy ponownie utworzyć wykres Pareto bez uwzględniania jako czynników energii liniowej oraz obszaru D1. Taki obraz przedstawia wykres na rys. 31



Rys. 31 Istotność obciążenia oraz obszaru D2 względem czasu do zerwania (model IV)

Z wykresu na rys. 31 wynika, że do generowania i analizy poprzednich modeli należy w tym przypadku przystąpić metodą regresji wielorakiej z uwzględnieniem dwóch zmiennych objaśniających.

Tablica 15: Oceny parametrów (model IV)

	Czas do zerwania [h] Param.	Czas do zerwania [h] Bł std.	Czas do zerwania [h] t	Czas do zerwania [h] p	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.	Czas do zerwania [h] Beta	Czas do zerwania [h] Beta std.	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.
Wyraz wolny	1310,11	191,1220	6,85482	0,000000	917,96	1702,26				
Obciążenie [%]	-1590,41	254,1251	-6,25839	0,000001	-2111,84	-1068,99	-1,00617	0,160771	-1,33605	-0,676294
"D2"	-139,82	28,4634	-4,91218	0,000039	-198,22	-81,42	-0,78974	0,160771	-1,11961	-0,459861

Tablica 16: Test SS dla pełnego modelu względem SS dla reszt (model IV)

	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
Czas do zerwania [h]	0,774075	0,599192	0,569503	138354,9	2	69177,43	92547,48	27	3427,684	20,18197	0,000004

Równanie prognozy dla: „Czas do zerwania [h]”

$$\text{Model IV: } t_z = 1310,1 - 1590,4 * Ob - 140,0 * D2$$

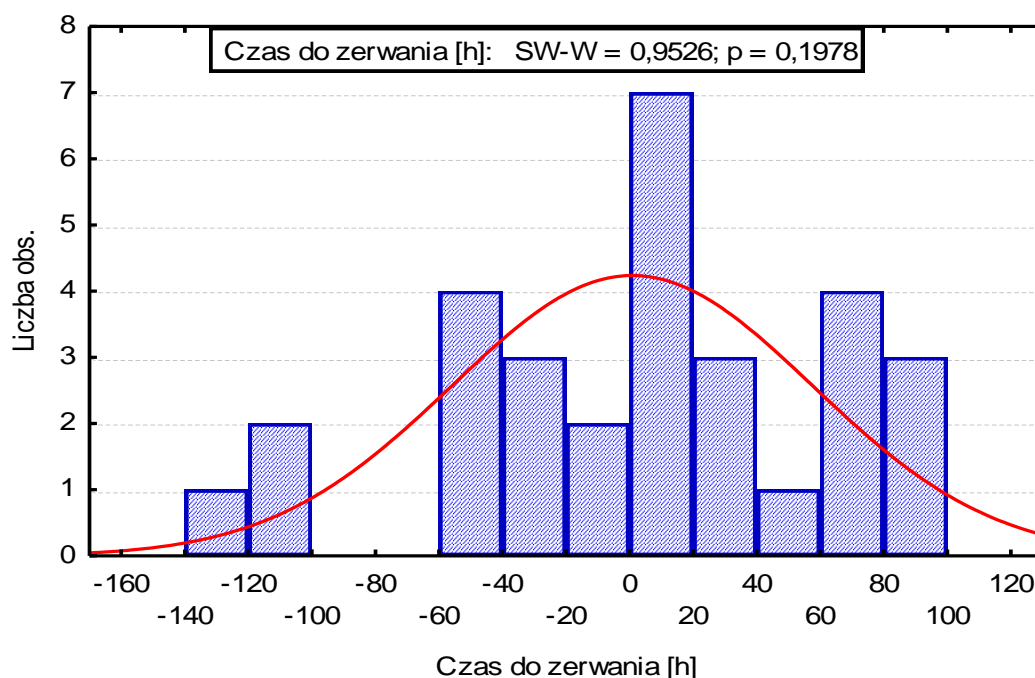
gdzie: D2 – czynnik oznaczający spoinę

Równanie utworzone zostało z wykorzystaniem danych otrzymanych w modelu ukazanym na tablicy 15. Widniejące w pierwszej kolumnie parametry – wyraz wolny, obciążenie oraz obszar D2 – zostały zaokrąglone i podstawione do równania liniowego. Równanie jest statystycznie istotne, można powiedzieć, że charakteryzuje się ono wysokimi wartościami współczynników dopasowania modelu do wyników eksperymentu.

Tablica 17: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty (model IV)

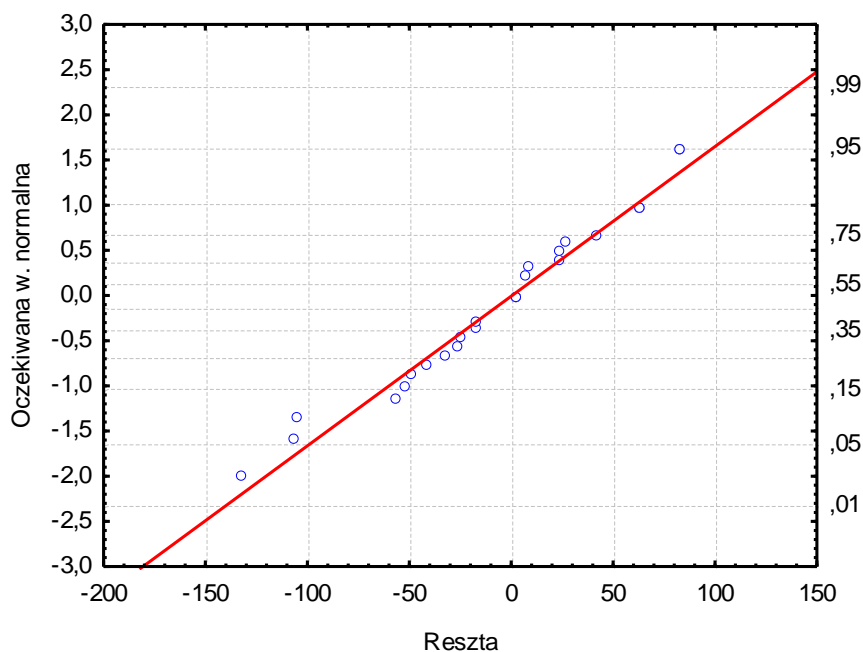
Nr	Czas do zerwania [h] Obserw.	Czas do zerwania [h] Przewid.	Czas do zerwania [h] Reszty
1	1,7500	-22,5203	24,270
2	5,6500	57,0004	-51,350
3	5,0000	136,5212	-131,521
4	200,0000	216,0419	-16,042
5	200,0000	136,5212	63,479
6	1,3000	57,0004	-55,700
7	120,3500	136,5212	-16,171
8	200,0000	136,5212	63,479
9	200,0000	136,5212	63,479
10	1,4000	-22,5203	23,920
11	66,5800	57,0004	9,580
12	16,1000	57,0004	-40,900
13	200,0000	136,5212	63,479
14	12,0000	37,7763	-25,776
15	200,0000	196,8178	3,182
16	200,0000	117,2971	82,703
17	1,0500	-41,7444	42,794
18	44,7000	37,7763	6,924
19	144,7000	117,2971	27,403
20	200,0000	196,8178	3,182
21	200,0000	117,2971	82,703
22	12,9000	37,7763	-24,876
23	85,0000	117,2971	-32,297
24	69,5000	117,2971	-47,797
25	200,0000	196,8178	3,182
26	200,0000	196,8178	3,182
27	10,8000	117,2971	-106,497
28	200,0000	196,8178	3,182
29	200,0000	117,2971	82,703
30	13,4000	117,2971	-103,897

Tablica 17 ukazuje wartości przewidywane, obserwowane oraz reszty dla przypadku uwzględniającego obciążenie oraz obszar D2. Przedstawione w tabeli dane zostały przedstawione w formie histogramu na rys. 32



Rys. 32 Histogram czasu do zerwania (model IV)

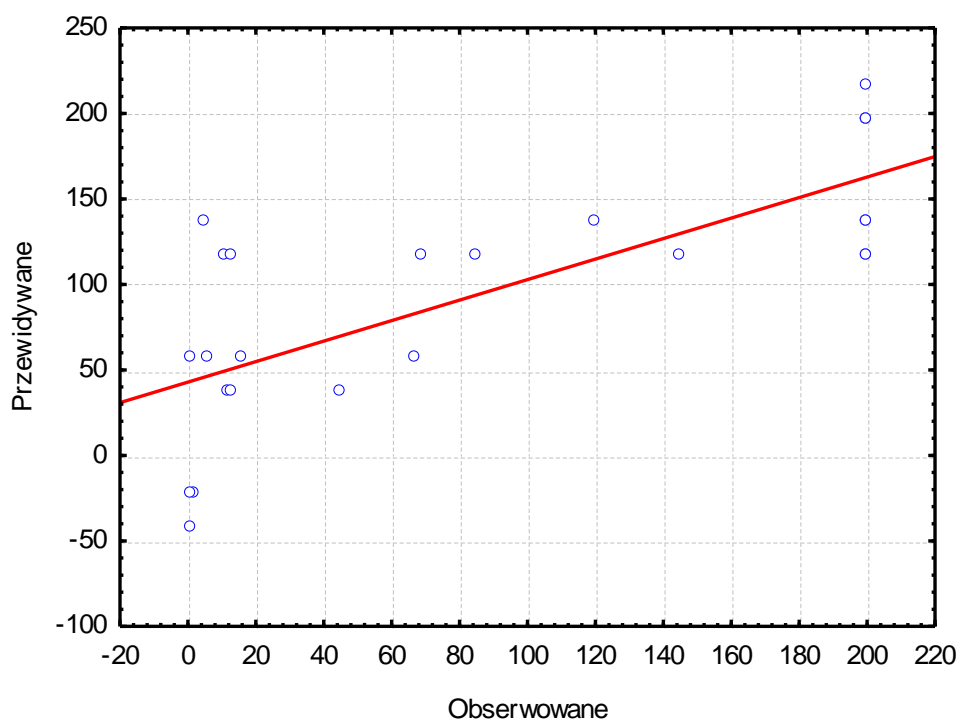
Powstały histogram mógłby zostać źle zinterpretowany przez wyłącznie ocenę wizualną. Należy jednak zwrócić uwagę, że obszar rozkładu mieści się w zbiorze $(-140;100)$, czyli najmniejszym jak dotychczas, a poziom $p = 0,1978$ kwalifikuje rozkład reszt jako normalny.



Rys. 33 Wykres normalności reszt (model IV)

Przedstawiony na rys. 33 wykres normalności reszt prezentuje rozkład reszt jako bardzo dobry. Jedynie kilka punktów nieco odstaje od linii rozkładu normalnego, natomiast pozostałe do niej przylegają. W tym wypadku wykres normalności reszt obrazuje rozkład reszt znacznie lepiej niż histogram.

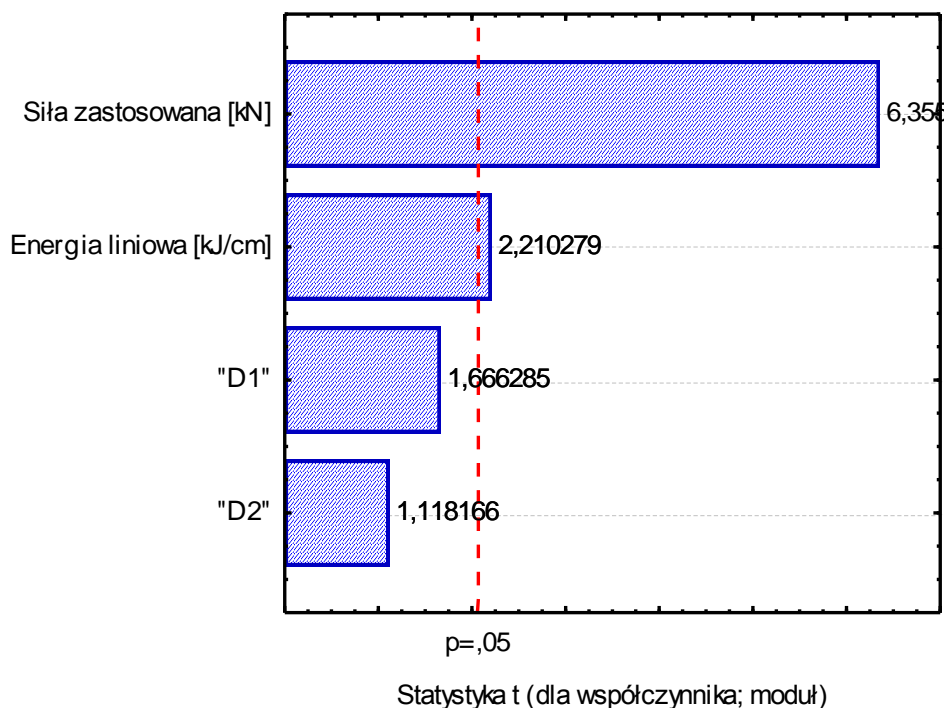
Na rys. 34 pokazano zależność między wartościami przewidywanymi opracowanego modelu IV a wartościami obserwowanymi.



Rys. 34 Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych (model IV)

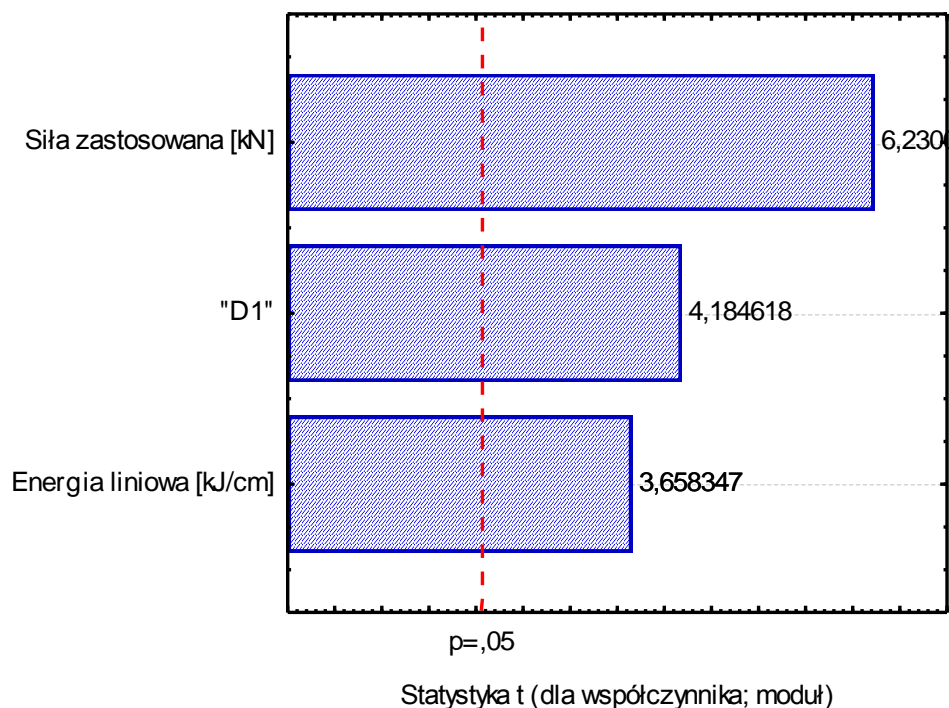
14.2. Czas do zerwania względem siły zastosowanej, obszaru D1 oraz energii liniowej (model V)

Kolejna analiza dotyczy próby opracowania modelu pokazującego wpływ siły zastosowanej, energii liniowej oraz obszarów D1 i D2. Taki dobór zmiennych przedstawiony jest na rys. 35



Rys. 35 Istotność siły zastosowanej, energii oraz obszarów względem czasu do zniszczenia

Z wykresu Pareto pokazanego na rys. 35 wynika, że statystycznie istotne są dwie zmienne: siła zastosowana i energia liniowa. Zgodnie z zalecanym postępowaniem należy usunąć najmniej znaczący czynnik, czyli w tym przypadku D2 i wygenerować wykres Pareto ponownie (rys. 36).



Rys. 36 Istotność siły zastosowanej, energii oraz D1 względem czasu do zniszczenia (model V)

Po ponownym wykonaniu wykresu okazało się, że obszar D1 również jest czynnikiem statystycznie istotnym, a nawet ma większy wpływ od energii liniowej. Dla modelu V będą zatem wzięte pod uwagę trzy czynniki.

Tablica 18: Oceny parametrów (model V)

	Czas do zerwania [h] Param.	Czas do zerwania [h] Bł.std.	Czas do zerwania [h] t	Czas do zerwania [h] p	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.	Czas do zerwania [h] Beta	Czas do zerwania [h] Beta std.	-95,00% Gr.ufn.	+95,00% Gr.ufn.
Wyraz wolny	1353,680	202,5584	6,68291	0,000000	937,315	1770,044				
Energia liniowa [kJ/cm]	-65,514	17,9080	-3,65835	0,001132	-102,324	-28,703	-0,577381	0,157826	-0,90180	-0,252966
Siła zastosowana [kN]	-100,523	16,1351	-6,23005	0,000001	-133,689	-67,356	-0,964050	0,154742	-1,28213	-0,645974
D1	112,826	26,9621	4,18462	0,000288	57,405	168,247	0,619737	0,148099	0,31532	0,924158

Tablica 19: Test SS dla pełnego modelu względem SS dla reszt (model V)

	Wielokr. R	Wielokr. R2	Skorygow R2	SS Model	df Model	MS Model	SS Reszta	df Reszta	MS Reszta	F	p
Czas do zerwania [h]	0,781250	0,610352	0,565392	140931,7	3	46977,22	89970,66	26	3460,410	13,57562	0,000016

Równanie prognozy dla: „Czas do zerwania [h]”

$$\text{Model V: } t_z = 1353,7 - 65,5 * EI - 100,5 * F_z + 112,8 * D1$$

gdzie: EI – energia liniowa [kJ/cm],

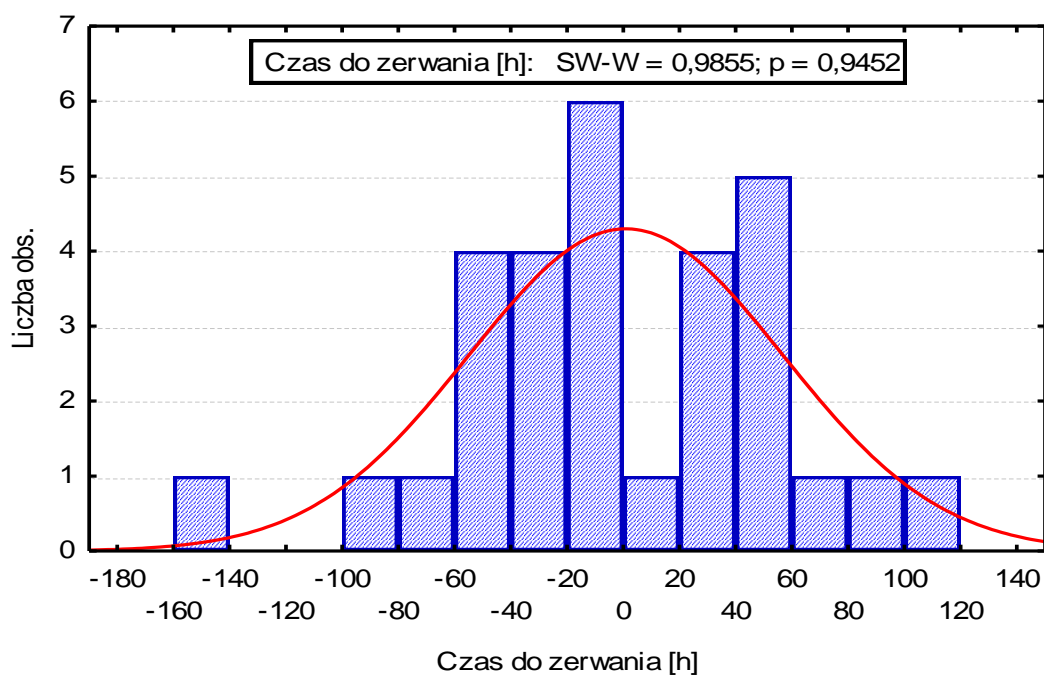
D1 – czynnik oznaczający SWC

Równanie utworzone zostało z wykorzystaniem danych otrzymanych w modelu ukazanym na tablicy 18. Widniejące w pierwszej kolumnie parametry – wyraz wolny, energia liniowa, siła zastosowana oraz obszar D1 – zostały zaokrąglone i podstawione do równania liniowego. Wartości współczynników dopasowania modelu są zadowalające.

Tablica 20: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty (model V)

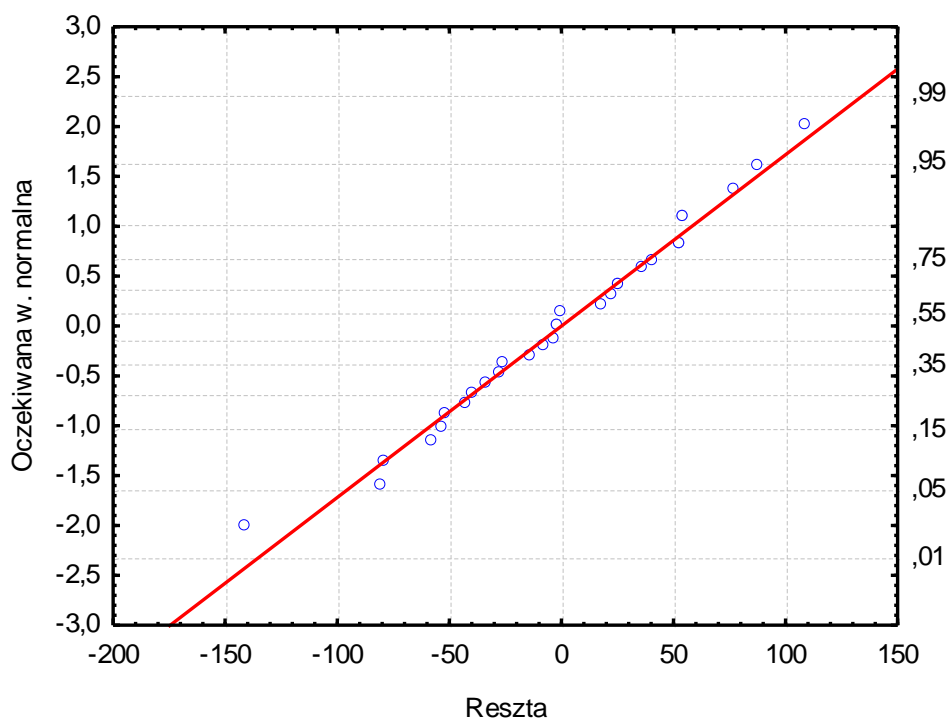
Nr	Czas do zerwania [h] Obserw.	Czas do zerwania [h] Przewid.	Czas do zerwania [h] Reszty
1	1,7500	-35,4136	37,164
2	5,6500	58,0725	-52,423
3	5,0000	146,5325	-141,533
4	200,0000	233,9873	-33,987
5	200,0000	146,5325	53,467
6	1,3000	58,0725	-56,773
7	120,3500	146,5325	-26,183
8	200,0000	146,5325	53,467
9	200,0000	145,5788	54,421
10	1,4000	-17,2680	18,668
11	66,5800	67,1711	-0,591
12	16,1000	67,1711	-51,071
13	200,0000	145,5788	54,421
14	12,0000	51,9098	-39,910
15	200,0000	203,6992	-3,699
16	200,0000	122,2758	77,724
17	1,0500	-40,5711	41,621
18	44,7000	51,9098	-7,210
19	144,7000	122,2758	22,424
20	200,0000	202,0605	-2,061
21	200,0000	112,5953	87,405
22	12,9000	27,1509	-14,251
23	85,0000	112,5953	-27,595
24	69,5000	112,5953	-43,095
25	200,0000	202,0605	-2,061
26	200,0000	173,9657	26,034
27	10,8000	91,5370	-80,737
28	200,0000	173,9657	26,034
29	200,0000	91,5370	108,463
30	13,4000	91,5370	-78,137

Tablica 20 ukazuje wartości przewidywane, obserwowane oraz reszty dla przypadku uwzględniającego siłę zastosowaną, energię liniową oraz obszar D1. Przedstawione w tabeli dane zostały przedstawione w formie histogramu na rys. 37



Rys. 37 Histogram czasu do zerwania (model V)

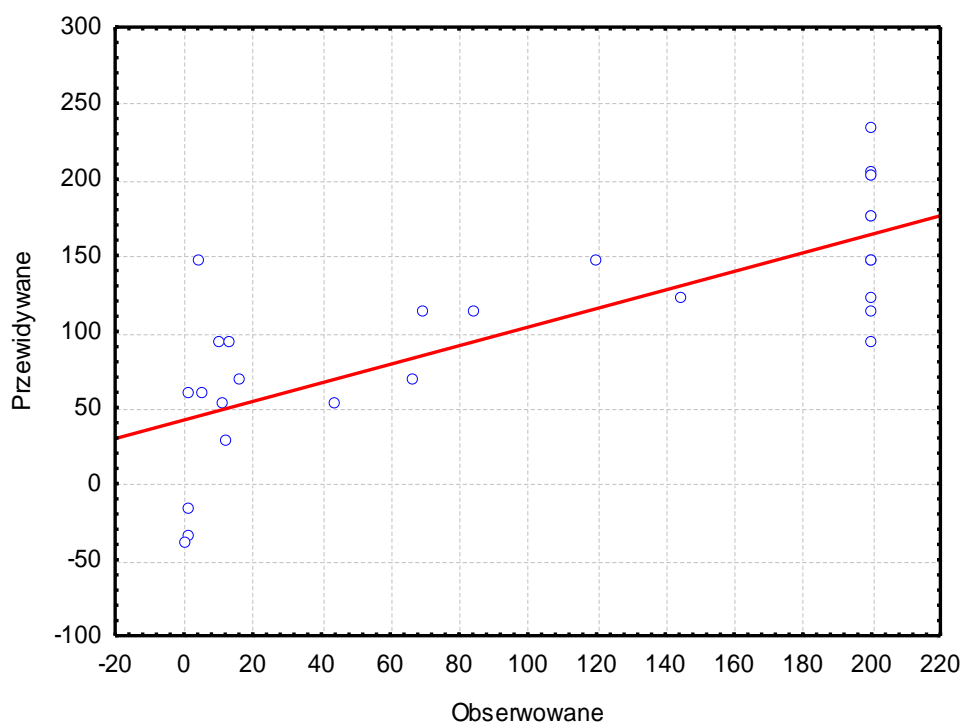
Histogram reszt dla w oparciu o trzy czynniki istotne statystycznie graficznie nie jest zadowalający, natomiast test Shapiro – Wilka wykazał poziom $p = 0,9452$, czyli jak dotąd jest to rozkład reszt o najwyższym dopasowaniu do rozkładu normalnego.



Rys. 38 Wykres normalności reszt (model V)

Potwierdzenie wysokiego przybliżenia do rozkładu normalnego, rozkład reszt oprócz testu Shapiro – Wilka znajduje także na wykresie na rys. 38. Jeden punkt dosyć znacząco odstaje od linii, natomiast cała reszta praktycznie jest do niej styczna. Można bez wahania stwierdzić, że jest to najlepszy wygenerowany dotąd wykres normalności reszt.

Na rys. 39 pokazano zależność między wartościami przewidywanymi opracowanego modelu V a wartościami obserwowanymi.



Rys. 39 Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych (model V)

15. Analiza modeli metodą regresji logistycznej dla czynników ilościowych

Dalsza analiza opiera się na regresji logistycznej. Dotychczas zmienną objaśnianą był czas do zerwania próbki, czyli wartość w zakresie od 0 do 200, przy czym 200 było informacją, że próbka nie uległa zerwaniu. Dla regresji logistycznej zmienną objaśnianą będzie zmienna dychotomiczna, która przyjmuje wartość 0 lub 1, określając przez to czy próbka uległa zerwaniu czy też nie. Czynniki zależne dopasowywane będą w sposób podobny jak poprzednio, ze względu na istotność. Formuła wdrażania czynników również niezmienna; najpierw analiza czynników ilościowych, później z uwzględnieniem kodowanych obszarów. W porównaniu do modeli regresji wielorakiej, inna jest w tym przypadku forma przedstawiania wielkości efektów oraz generowanego równania.

15.1. Pęknięcie względem obciążenia (model VI)

Z przeprowadzonych poprzednio analiz można przypuszczać, że energia liniowa nie będzie czynnikiem statystycznie istotnym. Tablica 21 przedstawia wielkości efektów dla obciążenia i energii względem pęknięcia. Dla tego rodzaj modelu, aby czynnik był istotny poziom p musi być mniejszy niż przyjęty ($\alpha=0,05$).

Tablica 21: Wielkości efektów; obciążenie i energia względem pęknięcia

N=30	Model: Regr. logistyczna (logit) N zer: 13 jedynek 17 Zmn. zal.: Pęknięcie Strata: Największe prawd. bł.średnkw.ska Całkowita strata: 16,776099476 Chi2(2)=7,5017 p=,02351		
	Stała B0	Energia liniowa [kJ/cm]	Obciążenie [%]
Ocena	-15,62362	0,07960245	2,210715E+01
Błąd standard.	7,095798	0,5715497	9,676206E+00
t(27)	-2,201813	0,1392748	2,284692E+00
poziom p	0,03640473	0,8902667	3,041162E-02
-95%CL	-30,18299	-1,093121	2,253218E+00
+95%CL	-1,064242	1,252326	4,196109E+01
Chi-kwadrat Walda	4,847979	0,01939746	5,219819E+00
poziom p	0,02768566	0,8892339	2,233739E-02
Iloraz szans z.jedn.	0,000000163964	1,082857	3,990379E+09
-95%CL	7,79278200E-14	0,3351689	9,518316E+00
+95%CL	0,3449892	3,498469	
Iloraz szans zakr.		1,184775	2,513353E+02
-95%CL		0,09745669	1,756467E+00
+95%CL		14,40325	3,596392E+04

Czerwonym kolorem zaznaczone są w tabeli wartości statystycznie istotne, a więc zgodnie z przypuszczeniami energia liniowa może zostać pominięta. W tablicy 22 pokazano wyniki regresji logistycznej zrealizowanej tylko dla obciążenia.

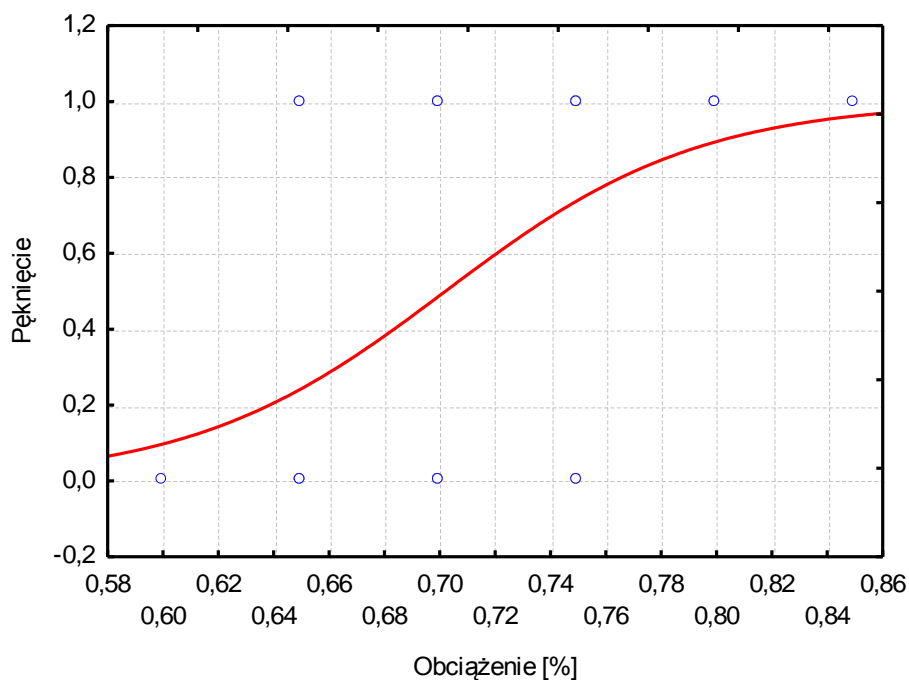
Tablica 22: Wielkości efektów; obciążenie względem pęknięcia (model VI)

Model: Regr. logistyczna (logit) N zer: 13 jedynek: 17 Zmn. zal.: Pęknięcie Strata: Największe prawd. bł.średnkw.ska Całkowita strata: 16,785804295 Chi2(1)=7,4823 p=,00623		
	Stała B0	Obciążenie [%]
N=30		
Ocena	-15,32085	2,182266E+01
Błąd standard.	6,736025	9,448289E+00
t(28)	-2,274464	2,309695E+00
poziom p	0,03079695	2,849453E-02
-95%CL	-29,11897	2,468722E+00
+95%CL	-1,522726	4,117661E+01
Chi-kwadrat Walda	5,173187	5,334690E+00
poziom p	0,02294468	2,091139E-02
Iloraz szans z.jedn.	0,0000002219423	3,002360E+09
-95%CL	0,0000000000002258351	1,180734E+01
+95%CL	0,2181165	
Iloraz szans zakr.		2,340807E+02
-95%CL		1,853694E+00
+95%CL		2,955924E+04

Po uwzględnieniu współczynników z tablicy 22 model logistyczny (model VI) przyjął postać:

$$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-15,321 + (21,8227) \cdot \text{Ob})}{1 + \exp(-15,321 + (21,8227) \cdot \text{Ob})}$$

Na rys. 40 pokazano interpretację graficzną otrzymanego modelu.

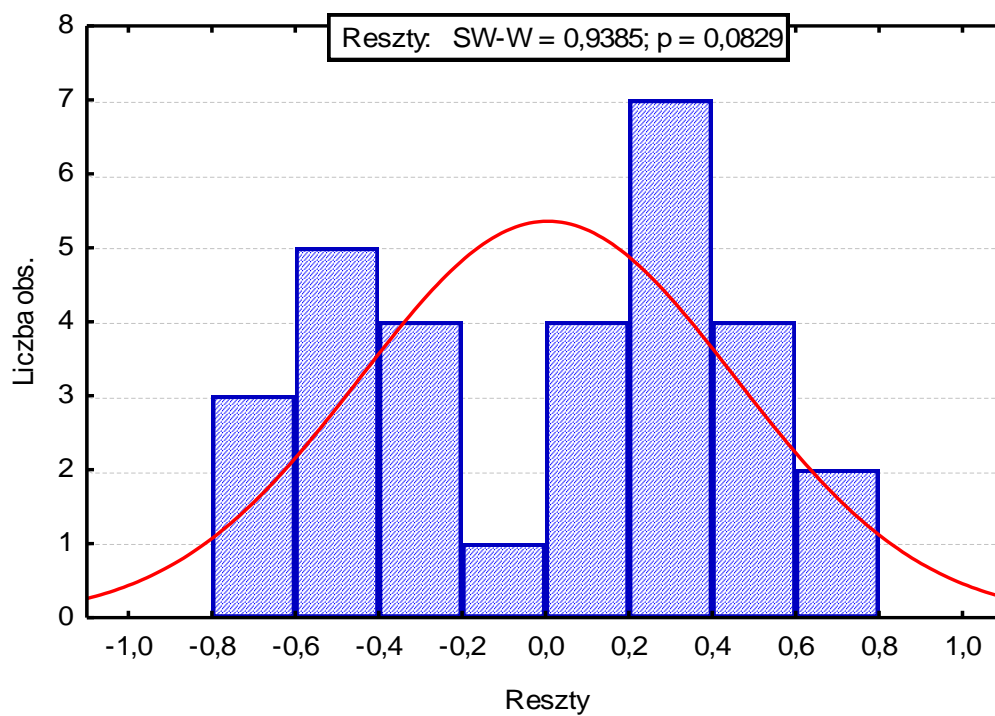


Rys. 40 Wykres krzywej sigmoidalnej (model VI)

Tablica 23: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty dla pęknięcia (model VI)

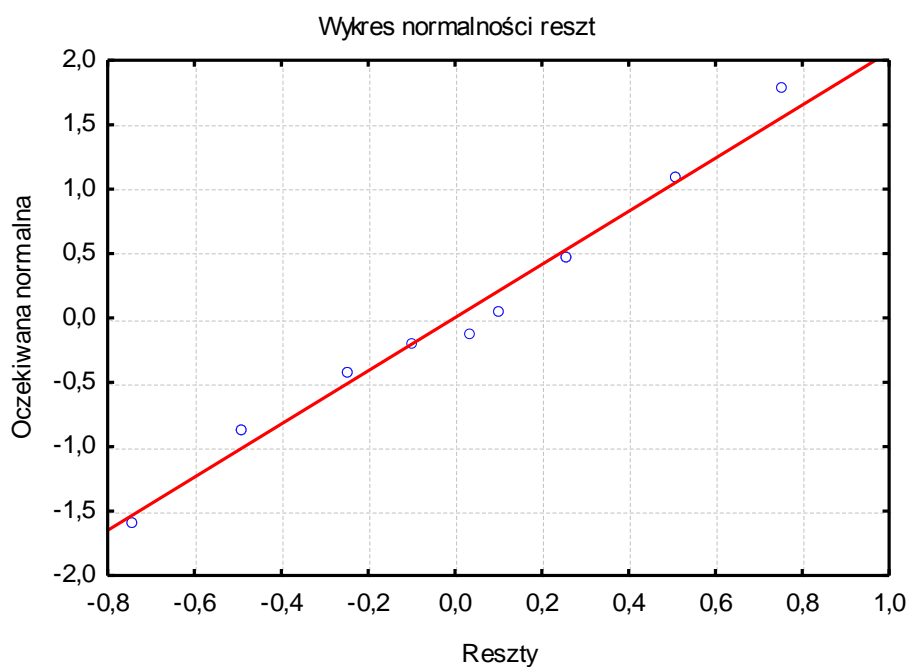
	Obserw.	Przewidyw.	Reszty
1	1,000000	0,740035	0,259965
2	1,000000	0,488756	0,511244
3	1,000000	0,243034	0,756966
4	0,000000	0,097330	-0,097330
5	0,000000	0,243034	-0,243034
6	1,000000	0,488756	0,511244
7	1,000000	0,243034	0,756966
8	0,000000	0,243034	-0,243034
9	0,000000	0,243034	-0,243034
10	1,000000	0,740035	0,259965
11	1,000000	0,488756	0,511244
12	1,000000	0,488756	0,511244
13	0,000000	0,243034	-0,243034
14	1,000000	0,894474	0,105526
15	0,000000	0,488756	-0,488756
16	0,000000	0,740035	-0,740035
17	1,000000	0,961890	0,038110
18	1,000000	0,894474	0,105526
19	1,000000	0,740035	0,259965
20	0,000000	0,488756	-0,488756
21	0,000000	0,740035	-0,740035
22	1,000000	0,894474	0,105526
23	1,000000	0,740035	0,259965
24	1,000000	0,740035	0,259965
25	0,000000	0,488756	-0,488756
26	0,000000	0,488756	-0,488756
27	1,000000	0,740035	0,259965
28	0,000000	0,488756	-0,488756
29	0,000000	0,740035	-0,740035
30	1,000000	0,740035	0,259965

W tabeli 23 od razu można zauważyć, że wartości obserwowane są dla pęknięcia tylko dwie. Teoretycznie więc, do przewidzenia wartości wystarczy 50% i reszty powinny wynosić 0 oraz -1. Jednak przewidywane uzyskiwane są z opracowanego modelu VI i wynoszą one różne wartości, co oczywiście ma swoje przełożenie na wartości reszt. Na rys. 41 rozkład reszt przedstawiony jest graficznie.



Rys. 41 Histogram rozkładu reszt (model VI)

Jeśli chodzi o test SW, poziom p został przekroczony, jednak graficznie histogram nie jest regularnie wzrastający. Na rys. 42 przedstawiona jest dalsza interpretacja rozkładu reszt.



Rys. 42 Wykres normalności reszt (model VI)

Na rys. 43 pokazano zależność między wartościami przewidywanymi opracowanego modelu VI a wartościami obserwowanymi.



Tablica 24: *Tabela poprawnie i niepoprawnie sklasyfikowanych przypadków (model VI)*

Tablica 24 zawiera najmniej informacji, ale jest bardzo dobrą formą podsumowania. Ukazuje procent poprawności osądu na bazie uwzględnionych czynników czy próbka pęknie. Jak widać, jeżeli uwzględnione jest jedynie obciążenie, poprawność oceny wynosi 70% czyli

jest dobra. Należy także zwrócić uwagę, że sytuacja, gdy obserw. 0,00000 a przewid. 1,00000 tak naprawdę nie pociąga za sobą konsekwencji. Próbka po prostu nie uległa zerwaniu podczas badania. Natomiast w sytuacji odwrotnej – obserw. 1,00000 a przewid. 0,00000 – próbka zamiast wytrzymać, w rzeczywistości zrywa się. Jeżeli nie byłaby to próbka, a element konstrukcji to wiązałoby się to z niebezpieczeństwem. Dlatego więc należy rozpatrzyć prognozy z uwzględnieniem kryterium bezpieczeństwa. W tym wypadku 6 próbek zostało tak oszacowanych, a więc 20% prognoz było niebezpiecznych.

15.2. Pęknięcie względem siły zastosowanej (model VII)

Zgodnie z założoną kolejnością postępowania wygenerowana została tablica 25, przedstawiająca wielkości efektów dla siły zastosowanej i energii liniowej wpływających na pęknięcie.

Tablica 25: Wielkości efektów; siła zastosowana i energia względem pęknięcia (model VII)

N=30	Model: Regr. logistyczna (logit) N zer: 13 jedynek: 17 Zmn. zal.: Pęknięcie Strata: Największe prawd. bł.średnkw.skál. Całkowita strata: 15,538943125 Chi2(2)=9,9760 p=,00682		
	Stała B0	Energia liniowa [kJ/cm]	Siła zastosowana [kN]
Ocena	-22,67281	0,4107035	1,874061
Błąd standard.	9,234149	0,6108751	0,7468331
t(27)	-2,455322	0,6723199	2,509344
poziom p	0,02080116	0,5070932	0,01839781
-95%CL	-41,61972	-0,8427086	0,3416859
+95%CL	-3,725901	1,664116	3,406436
Chi-kwadrat Walda	6,028606	0,4520141	6,296805
poziom p	0,01408112	0,5013849	0,01210047
Iloraz szans z.jedn.	0,000000000142339	1,507878	6,514698
-95%CL	8,40981000E-19	0,4305428	1,407318
+95%CL	0,02409139	5,281001	30,15756
Iloraz szans zakr.		2,398392	553,1254
-95%CL		0,1661325	3,162875
+95%CL		34,62467	96730,87

Tak jak przy wpływie obciążenia z energią liniową jako czynnikami objaśniającymi, w obecnym przypadku energia linowa również nie jest statystycznie istotna, a więc analizę powtórzono z uwzględnieniem tylko siły zastosowanej.

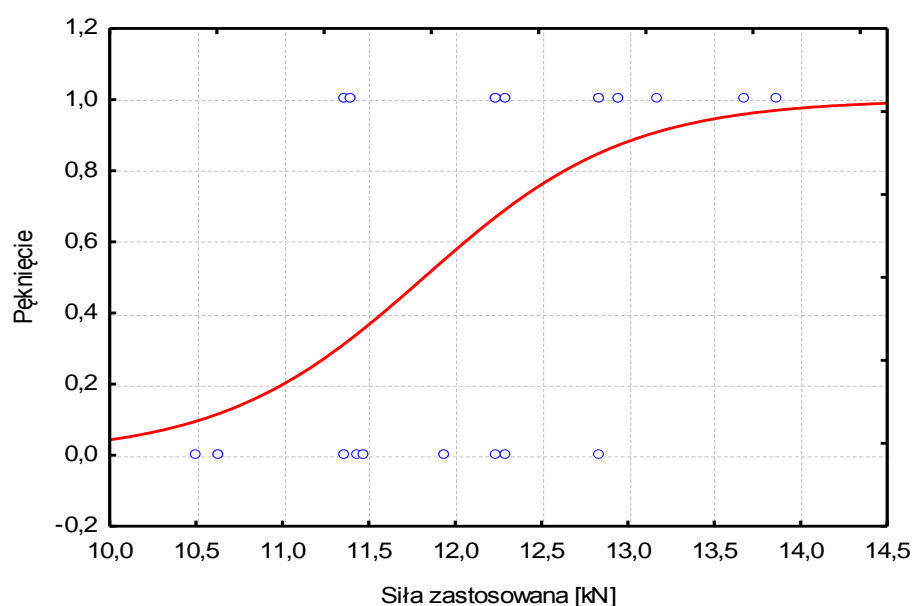
Tablica 26: *Wielkości efektów; siła zastosowana względem pęknięcia (model VII)*

	Model: Regr. logistyczna (logit) N zer: 13 jedynek: 17 Zmn. zal.: Pęknięcie Strata: Największe prawd. bł.średnkw.ska Całkowita strata: 15,771787270 Chi2(1)=9,5103 p=,00204	
	Stała B0	Siła zastosowana [kN]
N=30		
Ocena	-20,15158	1,704944
Błąd standard.	8,207982	0,6875782
t(28)	-2,45512	2,479636
poziom p	0,02055559	0,0194371
-95%CL	-36,96487	0,2965034
+95%CL	-3,338292	3,113384
Chi-kwadrat Walda	6,027614	6,148593
poziom p	0,01408904	0,01315677
Iloraz szans z.jedn.	0,000000001771249	5,501075
-95%CL	8,83814300E-17	1,345147
+95%CL	0,03549755	22,49704
Iloraz szans zakr.		312,8299
-95%CL		2,716153
+95%CL		36029,84

Po uwzględnieniu współczynników z tablicy 26 model logistyczny (model VII) przyjął postać:

$$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-20,152 + (1,70494) \cdot F_z)}{1 + \exp(-20,152 + (1,70494) \cdot F_z)}$$

Na rys. 44 pokazano interpretację graficzną otrzymanego modelu.

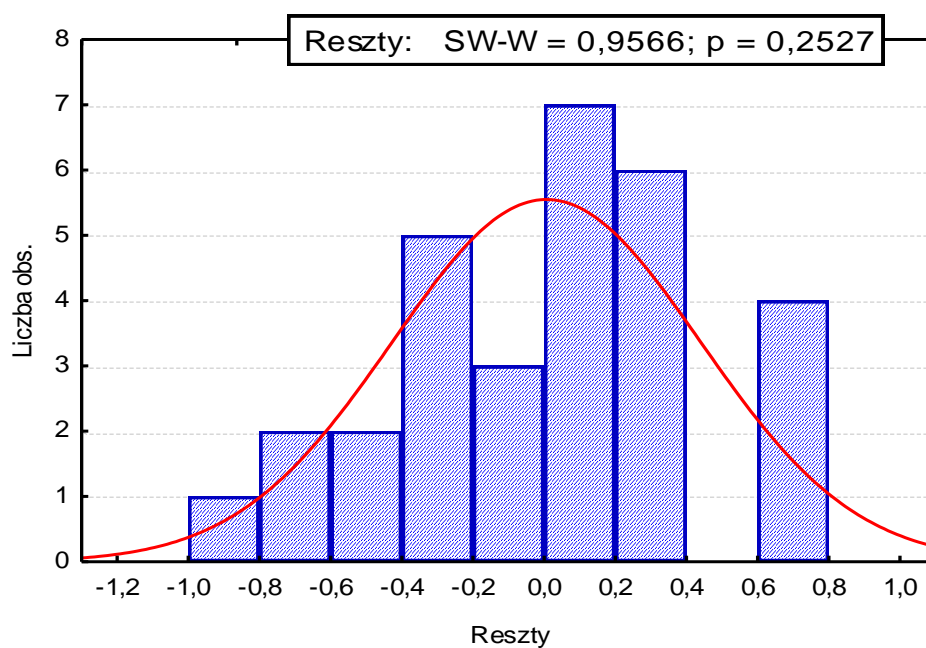


Rys. 44 *Wykres krzywej sigmoidalnej (model VII)*

Tablica 27: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty dla pęknięcia (model VII)

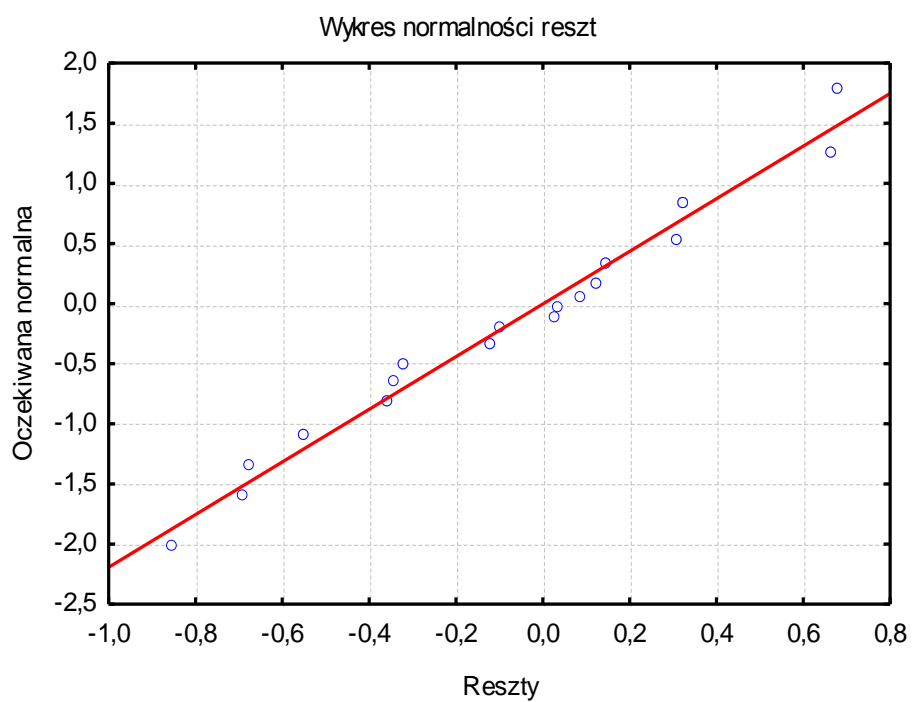
	Obserw.	Przewidyw.	Reszty
1	1,000000	0,910485	0,089515
2	1,000000	0,675678	0,324322
3	1,000000	0,317264	0,682736
4	0,000000	0,095378	-0,095378
5	0,000000	0,317264	-0,317264
6	1,000000	0,675678	0,324322
7	1,000000	0,317264	0,682736
8	0,000000	0,317264	-0,317264
9	0,000000	0,116291	-0,116291
10	1,000000	0,675678	0,324322
11	1,000000	0,332217	0,667783
12	1,000000	0,332217	0,667783
13	0,000000	0,116291	-0,116291
14	1,000000	0,872966	0,127034
15	0,000000	0,343660	-0,343660
16	0,000000	0,675678	-0,675678
17	1,000000	0,970573	0,029427
18	1,000000	0,872966	0,127034
19	1,000000	0,675678	0,324322
20	0,000000	0,551181	-0,551181
21	0,000000	0,848495	-0,848495
22	1,000000	0,959769	0,040231
23	1,000000	0,848495	0,151505
24	1,000000	0,848495	0,151505
25	0,000000	0,551181	-0,551181
26	0,000000	0,355287	-0,355287
27	1,000000	0,690440	0,309560
28	0,000000	0,355287	-0,355287
29	0,000000	0,690440	-0,690440
30	1,000000	0,690440	0,309560

Wykazane na Tablicy 27 wartości reszt są przedstawione graficznie na histogramie rozkładu reszt na rys. 45



Rys. 45 Histogram rozkładu reszt (model VII)

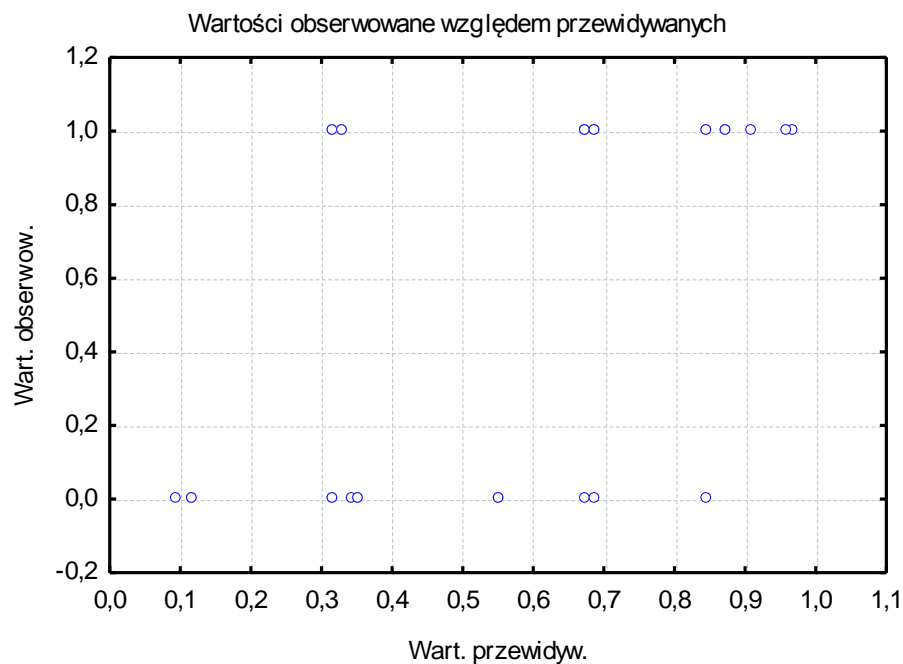
Rozkład reszt na histogramie dla siły zastosowanej ma większą wartość $p = 0,2527$ niż dla obciążenia. Model VII spełnia założenie normalności reszt.



Rys. 46 Wykres normalności reszt (model VII)

Wykres normalności reszt na rys. 46 ukazuje dużą ilość punktów odstających od linii normalnego rozkładu. Podobnie jak w przypadku obciążenia można zauważyć skłonność sinusoidalną.

Na rys. 47 pokazano zależność między wartościami przewidywanymi opracowanego modelu VII a wartościami obserwowanymi.



Rys. 47 Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych (model VII)

W tabelicy 28 pokazano tabelę klasyfikacji przypadków. Wartość ilorazu szans (5,2%) oznacza, że otrzymana klasyfikacja jest lepsza od przypadkowej.

Tablica 28: Tabela poprawnie i niepoprawnie sklasyfikowanych przypadków (model VII)

Obserw.	Klasyfikacja przypadków Il. szans: 5,2000 % poprawnych: 70,00%		
	Przew. 0,000000	Przew. 1,000000	Procent Popraw.
0,000000	8	5	61,53846
1,000000	4	13	76,47059

Tak jak dla czynnika obciążenia, poprawność szacowania zerwania próbki wyniosło 70%, jednak dla siły zastosowanej współczynnik niebezpiecznej prognozy to już tylko około 0,1333.

16. Analiza modeli metodą regresji logistycznej dla czynników ilościowych oraz obszarów występowania pęknięć

16. 1. Pęknięcie względem obciążenie i obszaru D1 (model VIII)

Kombinacja obciążenia z obszarami D1 oraz D2 nie wykazała żadnego statystycznie istotnego wpływu czynnika. Tak samo dla obciążenia i samego obszaru D2. Została już tylko możliwość obciążenia i obszaru D1, niestety – jak ukazuje tablica 30 – w tym przypadku istotne okazało się jedynie obciążenie.

Tablica 29: Wielkości efektów; pęknięcia względem obciążenia i obszaru D1

N=30	Model: Regr. logistyczna (logit) N zer: 13 jedynek: 17 Zmn. zal.: Pęknięcie Strata: Największe prawd. bł.średnkw.skł. Całkowita strata: 14,346427768 Chi2(2)=12,361 p=,00207		
	Stała B0	Obciążenie [%]	D1
Ocena	-24,01167	35,53244	-2,374083
Błąd standard.	9,793451	14,37402	1,248649
t(27)	-2,451809	2,471991	-1,901321
poziom p	0,02096704	0,0200304	0,06798226
-95%CL	-44,10617	6,039389	-4,9361
+95%CL	-3,917171	65,02551	0,1879334
Chi-kwadrat Walda	6,011368	6,110737	3,615022
poziom p	0,01421931	0,01344147	0,05726892
Iloraz szans z.jedn.	0,000000000037313		0,09309982
-95%CL	6,99731900E-20	419,6366	0,007182559
+95%CL	0,0198973		1,206753
Iloraz szans zakr.		7209,187	0,09309982
-95%CL		4,52604	0,007182559
+95%CL		11482970	1,206753

Poziom istotności D1 wyniósł niecałe 0,070 i był to przypadek, któremu najmniej brakowało do zakwalifikowania, więc podjęta została decyzja o podniesieniu wartości poziomu α z $\alpha = 0,05$ do $\alpha = 0,010$. W takim wypadku obciążenie i D1 mogą być czynnikami równocześnie istotnymi.

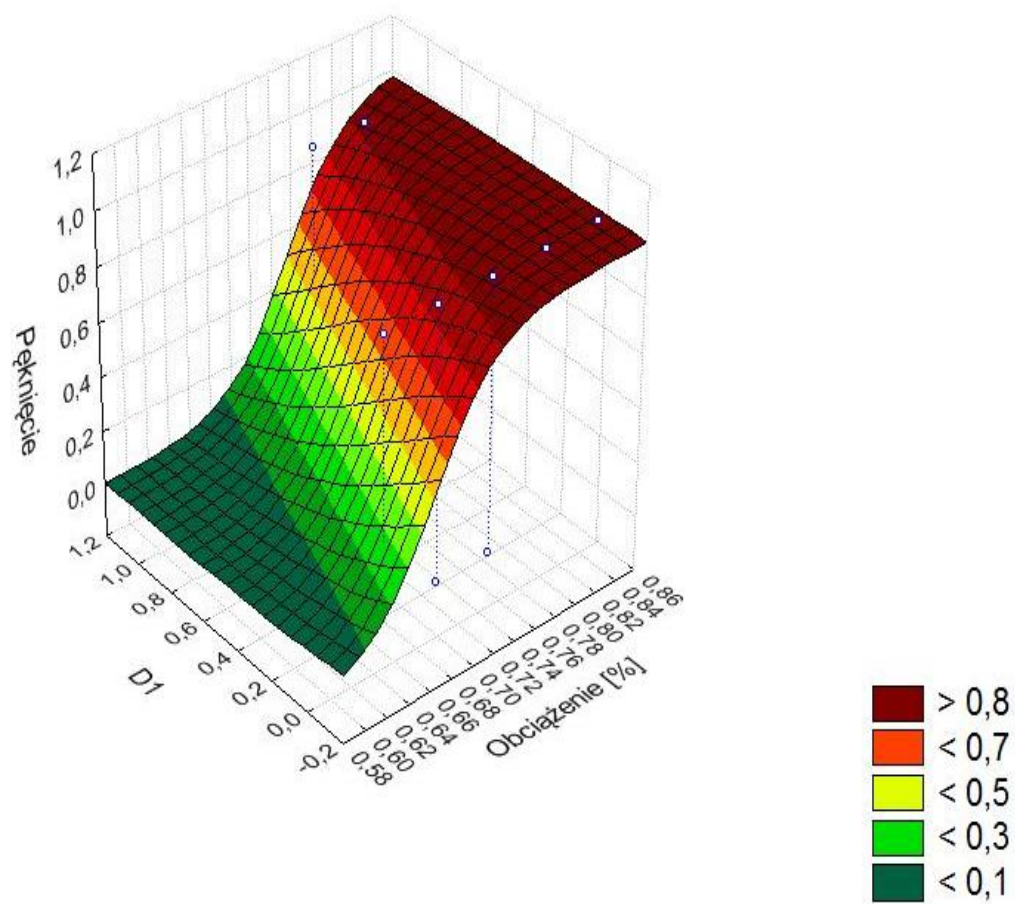
Tablica 30: Wielkości efektów; pęknięcia względem obciążenia i obszaru D1 (model VIII)

N=30	Model: Regr. logistyczna (logit) N zer: 13 jedynek: 17 Zmn. zal.: Pęknięcie Strata: Największe prawd. bł.średnkw.skali Całkowita strata: 14,346427768 Chi2(2)=12,361 p=,00207		
	Stała B0	Obciążenie [%]	D1
Ocena	-24,01167	35,53244	-2,374083
Błąd standard.	9,793451	14,37402	1,248649
t(27)	-2,451809	2,471991	-1,901321
poziom p	0,02096704	0,0200304	0,06798226
-95%CL	-44,10617	6,039389	-4,9361
+95%CL	-3,917171	65,02551	0,1879334
Chi-kwadrat Walda	6,011368	6,110737	3,615022
poziom p	0,01421931	0,01344147	0,05726892
Iloraz szans z.jedn.	0,000000000037313		0,09309982
-95%CL	6,99731900E-20	419,6366	0,007182559
+95%CL	0,0198973		1,206753
Iloraz szans zakr.		7209,187	0,09309982
-95%CL		4,52604	0,007182559
+95%CL		11482970	1,206753

Po uwzględnieniu współczynników z tablicy 30 model logistyczny (model VIII) przyjął postać:

$$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-24,012 + (35,5324) \cdot \text{Ob} + (-2,3741) \cdot \text{D1})}{1 + \exp(-24,012 + (35,5324) \cdot \text{Ob} + (-2,3741) \cdot \text{D1})}$$

Na rys. 48 pokazano interpretację graficzną otrzymanego modelu.

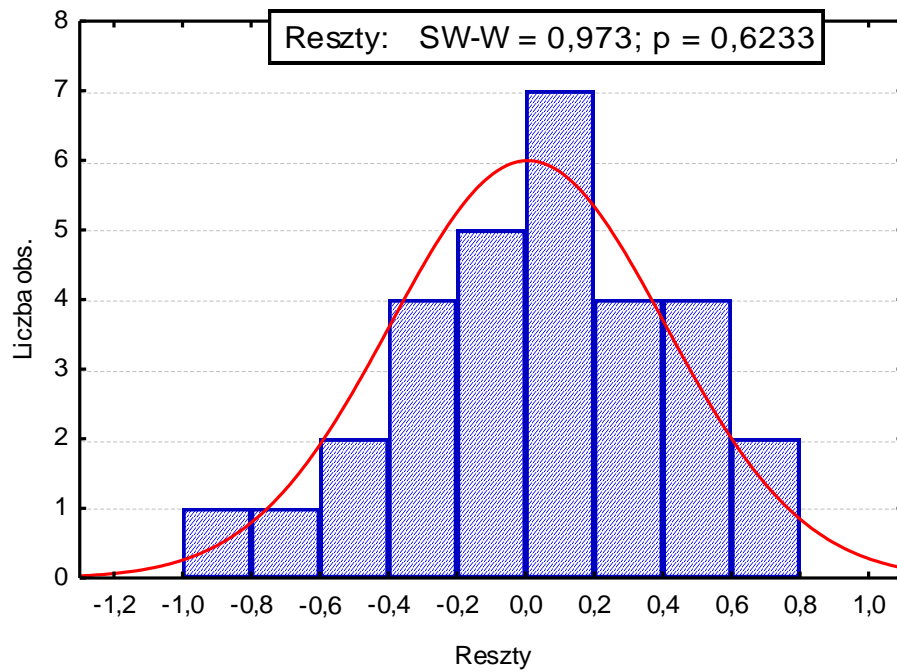


Rys. 48 Wykres występowania pęknięcia pod wpływem obciążenia i obszaru D1

Tablica 31: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty dla pęknięcia (model VIII)

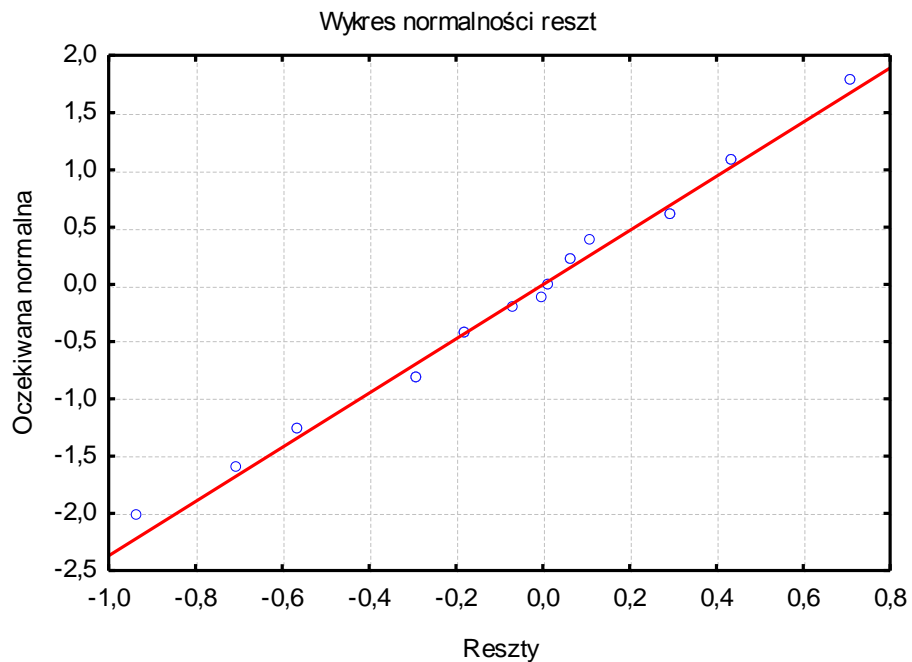
	Obserw.	Przewidyw.	Reszty
1	1,000000	0,933246	0,066754
2	1,000000	0,702878	0,297122
3	1,000000	0,285859	0,714141
4	0,000000	0,063435	-0,063435
5	0,000000	0,285859	-0,285859
6	1,000000	0,702878	0,297122
7	1,000000	0,285859	0,714141
8	0,000000	0,285859	-0,285859
9	0,000000	0,285859	-0,285859
10	1,000000	0,933246	0,066754
11	1,000000	0,702878	0,297122
12	1,000000	0,702878	0,297122
13	0,000000	0,285859	-0,285859
14	1,000000	0,988042	0,011958
15	0,000000	0,702878	-0,702878
16	0,000000	0,933246	-0,933246
17	1,000000	0,997956	0,002044
18	1,000000	0,988042	0,011958
19	1,000000	0,933246	0,066754
20	0,000000	0,180488	-0,180488
21	0,000000	0,565516	-0,565516
22	1,000000	0,884954	0,115046
23	1,000000	0,565516	0,434484
24	1,000000	0,565516	0,434484
25	0,000000	0,180488	-0,180488
26	0,000000	0,180488	-0,180488
27	1,000000	0,565516	0,434484
28	0,000000	0,180488	-0,180488
29	0,000000	0,565516	-0,565516
30	1,000000	0,565516	0,434484

Interpretacja graficzna rozkładu reszt z tablicy 31 odbywa się na histogramie na rys. 49 oraz na wykresie normalności reszt na rys. 50



Rys. 49 Histogram rozkładu reszt (model VIII)

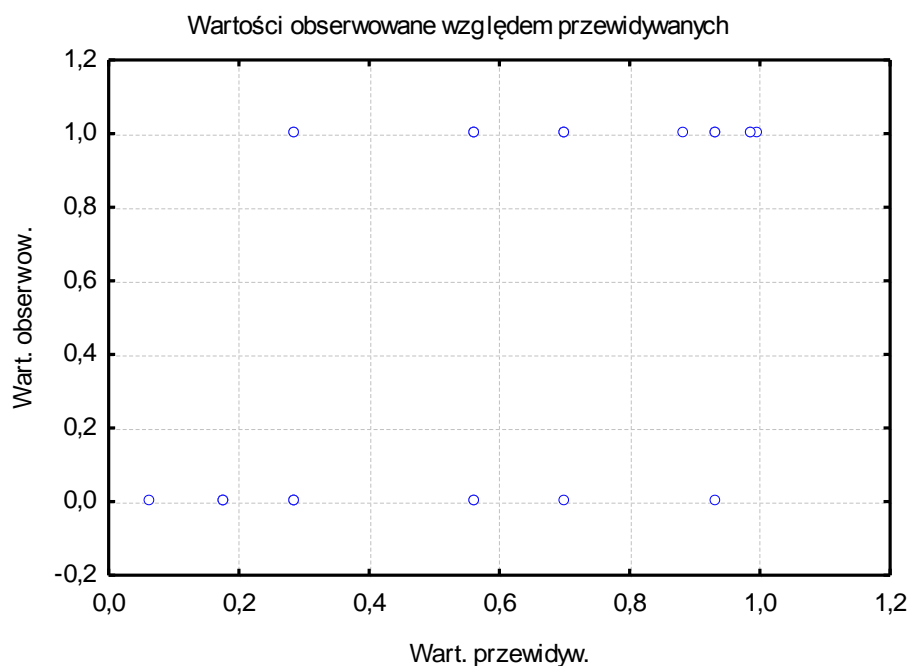
Test Shapiro – Wilka wykazał bardzo wysoki poziom $p = 0,6233$. Graficznie histogram prezentuje się zadowalająco, model spełnia założenie normalności reszt.



Rys. 50 Wykres normalności reszt (model VIII)

Wykres z rys. 50 przedstawia większość punktów stykających do linii normalnego rozkładu. Oba modele dotyczące rozkładu reszt można określić jako pozytywne.

Na rys. 51 pokazano zależność między wartościami przewidywanymi opracowanego modelu VIII a wartościami obserwowanymi.



Rys. 51 Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych

W tablicy 32 pokazano tabelę klasyfikacji przypadków. Wartość ilorazu szans (16,875%) jest jak dotąd największa, klasyfikacja jest lepsza od przypadkowej.

Tablica 32: Tabela poprawnie i niepoprawnie sklasyfikowanych przypadków (model VIII)

Obserw.	Klasyfikacja przypadków		
	Il. szans: 16,875 % poprawnych: 80,00		
	Przew. 0,000000	Przew. 1,000000	Procent Popraw.
0,000000	9	4	69,23077
1,000000	2	15	88,23529

Jak widać z tablicy 32, przy uwzględnieniu dwóch istotnych statystycznie czynników, efekt poprawności oceny jest o 10% lepszy niż przy jednym. Dodatkowo, poziom niebezpiecznej błędnej prognozy wynosi tylko około 6,67%.

16. 2. Pęknięcie względem siły zastosowanej i obszaru D1 (model IX)

Podobnie jak w przypadku obciążenia, dla siły zastosowanej również należało sprawdzić istotność trzech wariantów. Dla siły zastosowanej i obszaru D1 poziom p czynnika D1 nieznacznie przekroczył wartość 0,05, więc ponownie dopuszczalny poziom p został zwiększony do 0,10. Wielkość efektów dla tego wariantu przedstawia tablica 33.

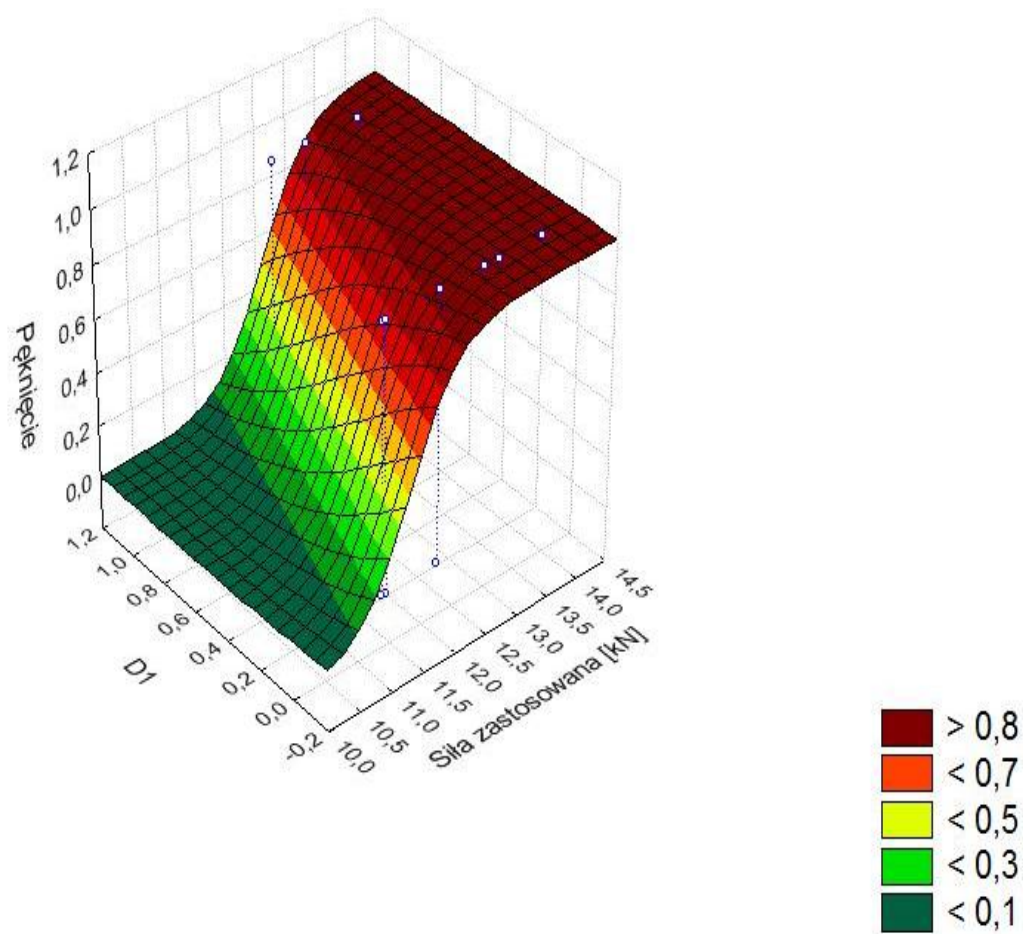
Tablica 33: Wielkości efektów; pęknięcie względem siły zastosowanej i obszaru D1 (model IX)

	Model: Regr. logistyczna (logit) N zer: 13 jedynek: 17 Zmn. zal.: Pęknięcie Strata: Największe prawd. bł.średnkw.skali. Całkowita strata: 12,932850466 Chi2(2)=15,188 p=,00050		
	Stała B0	Siła zastosowana [kN]	D1
N=30			
Ocena	-31,30264	2,736149	-2,697432
Błąd standard.	12,3569	1,073674	1,355709
t(27)	-2,533211	2,548399	-1,989683
poziom p	0,01741995	0,016823	0,05684241
-95%CL	-56,65691	0,5331525	-5,479117
+95%CL	-5,948375	4,939145	0,08425359
Chi-kwadrat Walda	6,41716	6,494338	3,958839
poziom p	0,01130701	0,01082649	0,04663433
Iloraz szans z.jedn.	2,54351800E-14	15,42746	0,06737833
-95%CL	2,47865600E-25	1,704297	0,004173012
+95%CL	0,002610078	139,6508	1,087905
Iloraz szans zakr.		10105,36	0,06737833
-95%CL		6,02986	0,004173012
+95%CL		16935430	1,087905

Po uwzględnieniu współczynników z tablicy 33 model logistyczny (model IX) przyjął postać:

$$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-31,303 + (2,73615) \cdot Fz + (-2,6974) \cdot D1)}{(1 + \exp(-31,303 + (2,73615) \cdot Fz + (-2,6974) \cdot D1))}$$

Na rys. 52 pokazano interpretację graficzną otrzymanego modelu.

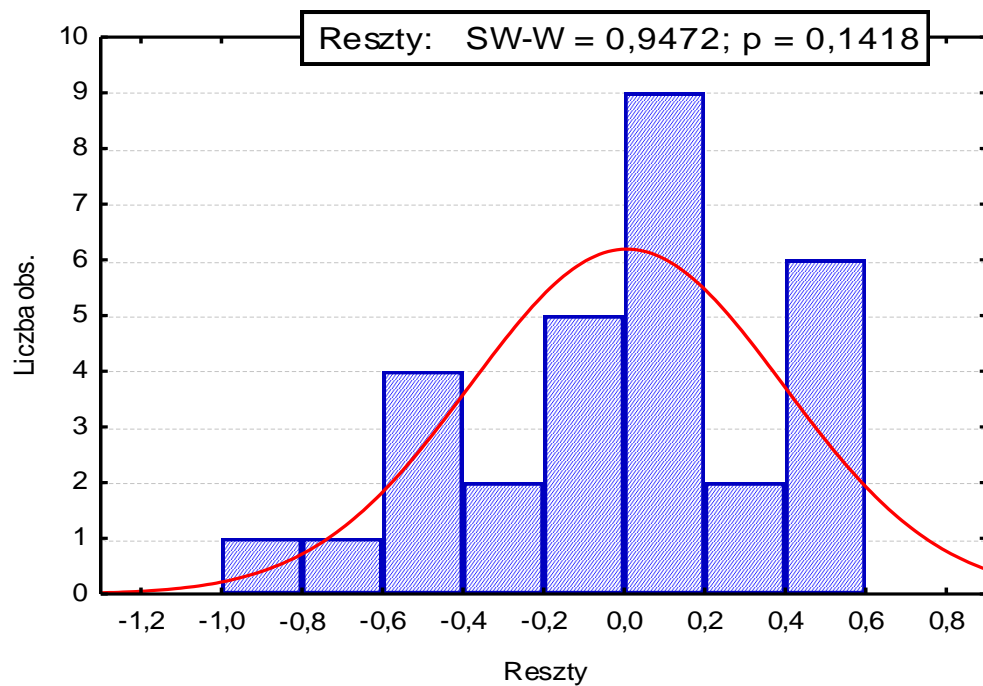


Rys. 52 Wykres występowania pęknięcia pod wpływem siły zastosowanej i obszaru D1
(model IX)

Tablica 34: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty dla pęknięcia (model IX)

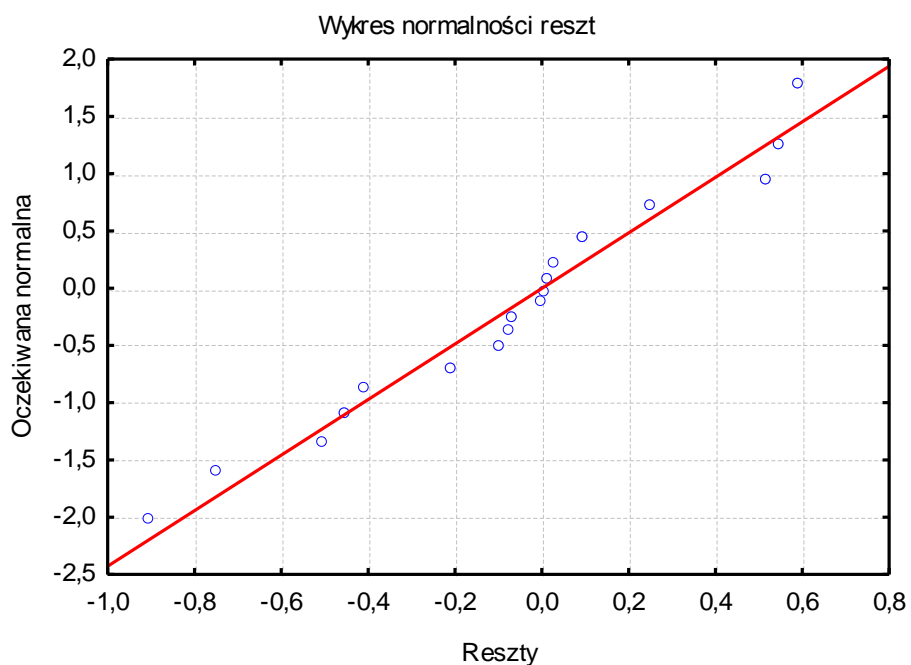
	Obserw.	Przewidyw.	Reszty
1	1,000000	0,991505	0,008495
2	1,000000	0,901604	0,098396
3	1,000000	0,451990	0,548010
4	0,000000	0,070891	-0,070891
5	0,000000	0,451990	-0,451990
6	1,000000	0,901604	0,098396
7	1,000000	0,451990	0,548010
8	0,000000	0,451990	-0,451990
9	0,000000	0,098200	-0,098200
10	1,000000	0,901604	0,098396
11	1,000000	0,479216	0,520784
12	1,000000	0,479216	0,520784
13	0,000000	0,098200	-0,098200
14	1,000000	0,984179	0,015821
15	0,000000	0,499725	-0,499725
16	0,000000	0,901604	-0,901604
17	1,000000	0,998705	0,001295
18	1,000000	0,984179	0,015821
19	1,000000	0,901604	0,098396
20	0,000000	0,209084	-0,209084
21	0,000000	0,751142	-0,751142
22	1,000000	0,968642	0,031358
23	1,000000	0,751142	0,248858
24	1,000000	0,751142	0,248858
25	0,000000	0,209084	-0,209084
26	0,000000	0,068087	-0,068087
27	1,000000	0,407863	0,592137
28	0,000000	0,068087	-0,068087
29	0,000000	0,407863	-0,407863
30	1,000000	0,407863	0,592137

Interpretacja graficzna rozkładu reszt z tablicy 34 ukazana jest na histogramie na rys. 53 oraz na wykresie normalności reszt na rys. 54



Rys. 53 Histogram rozkładu reszt (model IX)

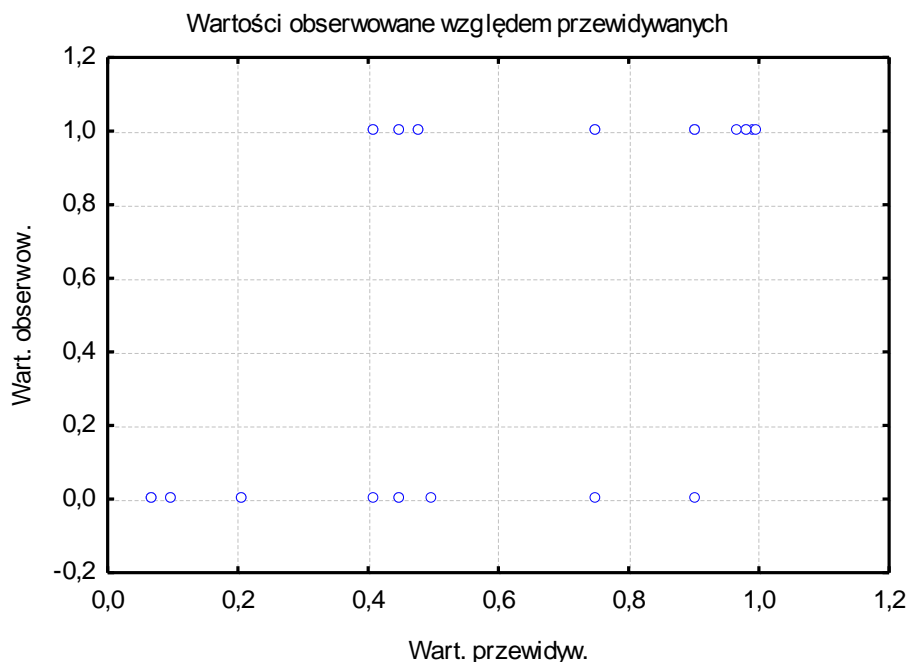
Histogram rozkładu reszt dla wpływu siły zastosowanej i obszaru D1 graficznie nie jest zadowalający, natomiast test SW wykazał poziom $p = 0,1418$ oznaczający poprawność matematyczną modelu.



Rys. 54 Wykres normalności reszt (model IX)

Wykresie normalności z rys. 54 wykazuje dużą ilość punktów odstających od linii normalnego rozkładu w sposób sinusoidalny. Modele dotyczące rozkładu reszt dla przypadku siły zastosowanej i obszaru D1 są niekorzystne.

Na rys. 55 pokazano zależność między wartościami przewidywanymi opracowanego modelu IX a wartościami obserwowanymi.



Rys. 55 Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych (model IX)

W tablicy 35 pokazano tabelę klasyfikacji przypadków. Wartość ilorazu szans (10,083%) oznacza, że klasyfikacja jest lepsza od przypadkowej.

Tablica 35: Tabela poprawnie i niepoprawnie sklasyfikowanych przypadków (model IX)

Obserw.	Klasyfikacja przypadków		
	Il. szans: 10,083 % poprawnych: 73,33		
	Przew. 0,000000	Przew. 1,000000	Procent Popraw.
0,000000	11	2	84,61539
1,000000	6	11	64,70588

Poprawność oceny z uwzględnieniem siły zastosowanej i obszaru D1 nie jest już tak pomyślna jak dla obciążenia i D1, która wyniosła 80%. Z kolei procent prognoz niebezpiecznych to aż 20%, czyli jak w przypadku z uwzględnionym samym obciążeniem.

16. 3. Pęknięcie względem siły zastosowanej i obszaru D2 (model X)

W przypadku uwzględnienia jako czynników objaśniających siły zastosowanej oraz obszaru D2 oba okazały się statystycznie istotne bez konieczności zmiany wartości dopuszczalnego poziomu p.

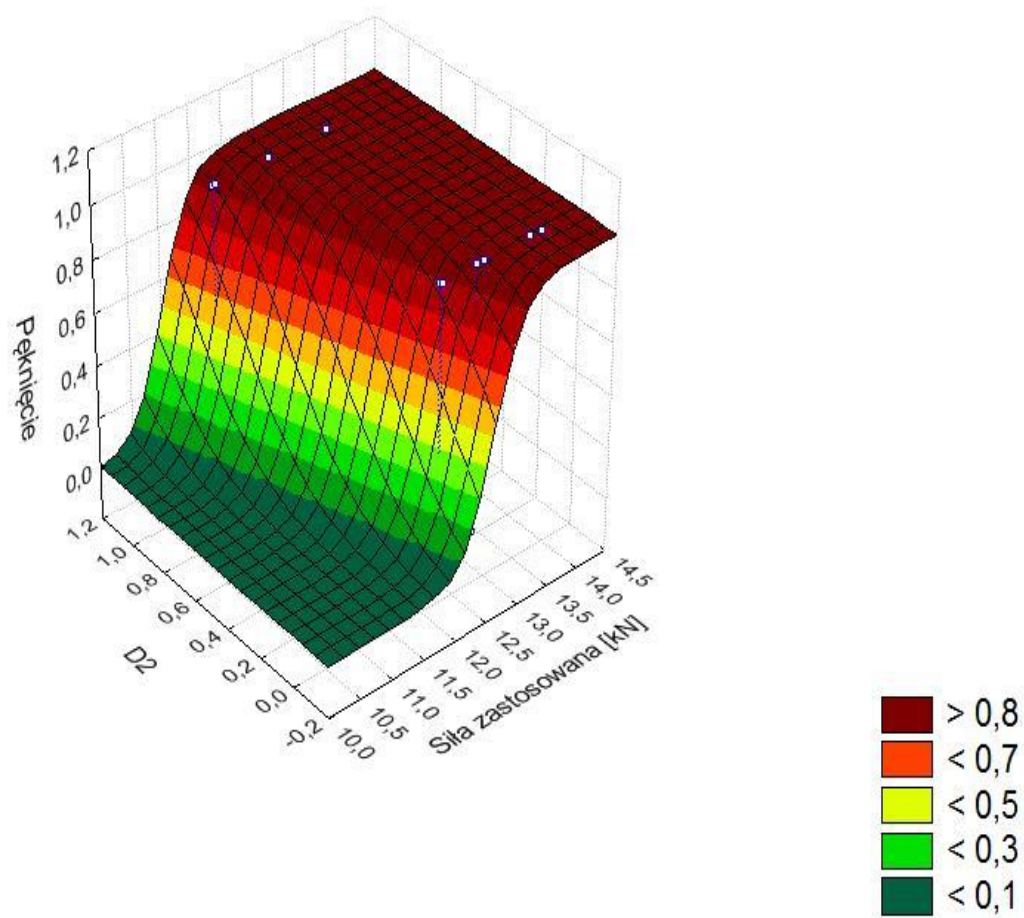
Tablica 36: Wielkości efektów; pęknięcie względem siły zastosowanej i obszaru D2 (model X)

N=30	Model: Regr. logistyczna (logit) N zer: 13 jedynek 17 Zmn. zal.: Pęknięcie Strata: Największe prawd. bł.średnkw.skł Całkowita strata: 10,542243985 Chi2(2)=19,969 p=,00005		
	Stała B0	Siła zastosowana [kN]	D2
Ocena	-56,1997	4,552170E+00	4,991293
Błąd standard.	23,9854	1,943695E+00	2,247068
t(27)	-2,343079	2,342019E+00	2,221247
poziom p	0,02674273	2,680558E-02	0,03491098
-95%CL	-105,4137	5,640376E-01	0,3806904
+95%CL	-6,985713	8,540303E+00	9,601896
Chi-kwadrat Walda	5,490019	5,485053E+00	4,933939
poziom p	0,01913142	1,918584E-02	0,0263412
Iloraz szans z.jedn.	3,91543400E-25	9,483801E+01	147,1266
-95%CL	0	1,757755E+00	1,463295
+95%CL	0,000925003	5,116895E+03	14792,8
Iloraz szans zakr.		4,596536E+06	147,1266
-95%CL		6,691291E+00	1,463295
+95%CL		3,157558E+12	14792,8

Po uwzględnieniu współczynników z tablicy 33 model logistyczny (model X) przyjął postać:

$$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-56,2 + (4,55217) \cdot Fz + (4,99129) \cdot D2)}{(1 + \exp(-56,2 + (4,55217) \cdot Fz + (4,99129) \cdot D2))}$$

Na rys. 56 pokazano interpretację graficzną otrzymanego modelu.

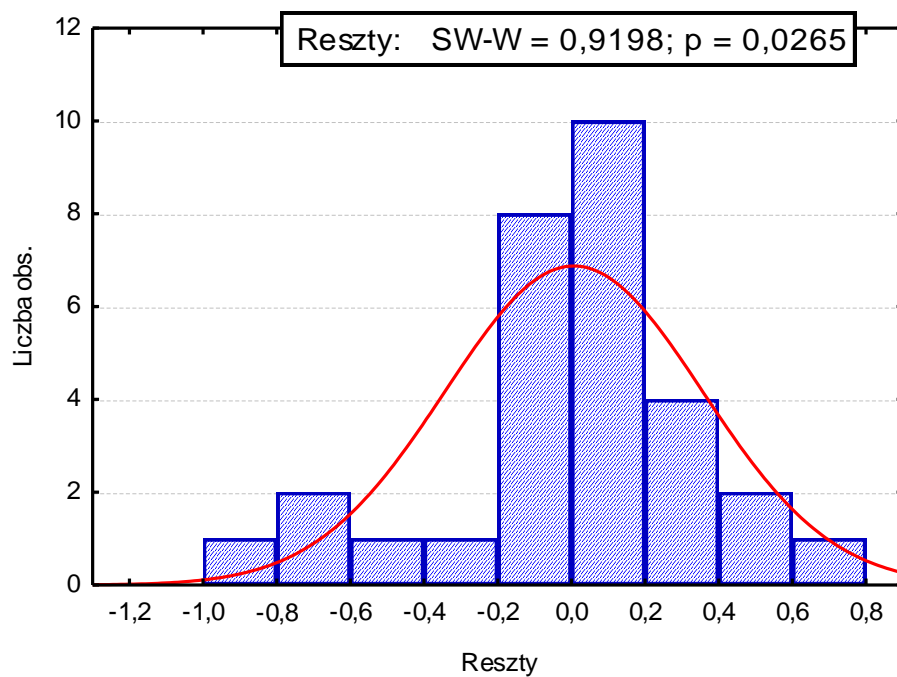


Rys. 56 Wykres występowania pęknięcia pod wpływem siły zastosowanej i obszaru D2
(model X)

Tablica 37: Wartości obserwowane, przewidywane i reszty dla pęknięcia (model X)

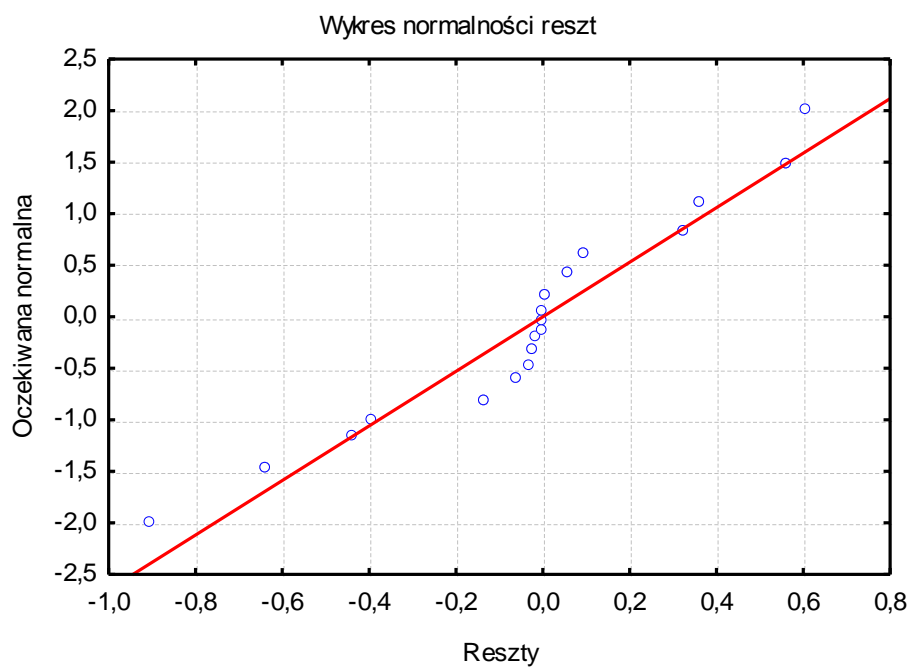
	Obserw.	Przewidyw.	Reszty
1	1,000000	0,991505	0,008495
2	1,000000	0,901604	0,098396
3	1,000000	0,451990	0,548010
4	0,000000	0,070891	-0,070891
5	0,000000	0,451990	-0,451990
6	1,000000	0,901604	0,098396
7	1,000000	0,451990	0,548010
8	0,000000	0,451990	-0,451990
9	0,000000	0,098200	-0,098200
10	1,000000	0,901604	0,098396
11	1,000000	0,479216	0,520784
12	1,000000	0,479216	0,520784
13	0,000000	0,098200	-0,098200
14	1,000000	0,984179	0,015821
15	0,000000	0,499725	-0,499725
16	0,000000	0,901604	-0,901604
17	1,000000	0,998705	0,001295
18	1,000000	0,984179	0,015821
19	1,000000	0,901604	0,098396
20	0,000000	0,209084	-0,209084
21	0,000000	0,751142	-0,751142
22	1,000000	0,968642	0,031358
23	1,000000	0,751142	0,248858
24	1,000000	0,751142	0,248858
25	0,000000	0,209084	-0,209084
26	0,000000	0,068087	-0,068087
27	1,000000	0,407863	0,592137
28	0,000000	0,068087	-0,068087
29	0,000000	0,407863	-0,407863
30	1,000000	0,407863	0,592137

Rozkładu reszt z tablicy 37 w formie histogramu przedstawia rys. 57 oraz, natomiast na rys. 58 ukazany jest wykres normalności reszt.



Rys. 57 Histogram rozkładu reszt (model X)

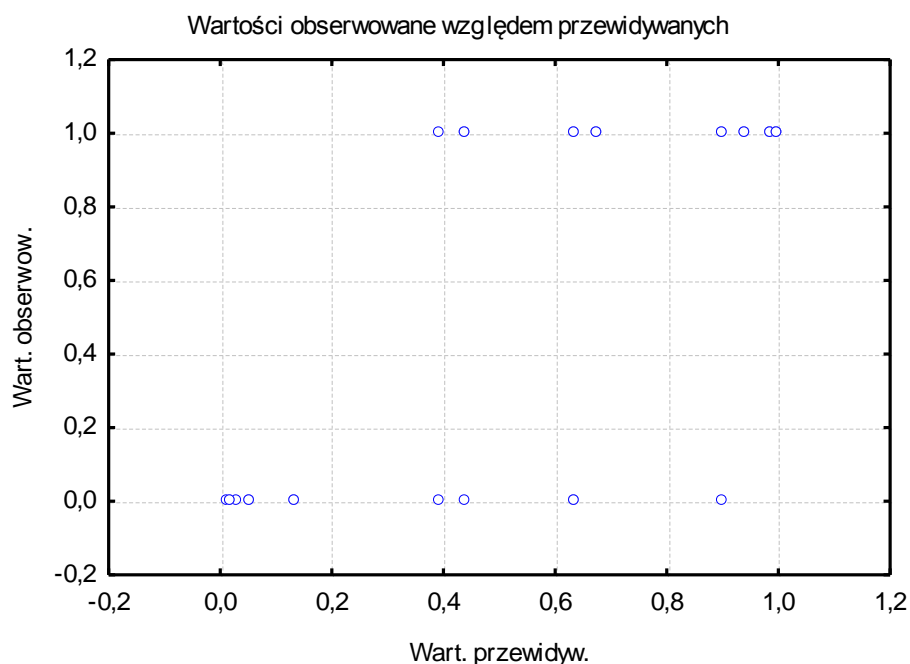
Przedstawiony powyżej rys. 57 jest wizualnie najgorszym histogramem obserwowanym podczas analizy modeli logistycznych. Potwierdza to również test SW, który określa poziom $p = 0,0265$, co oznacza że nie jest on nawet poprawny matematycznie.



Rys. 58 Wykres normalności reszt (model X)

Już na podstawie wcześniejszego histogramu rozkładu reszt można było spodziewać się, że wykres normalności reszt będzie w podobnym stanie. Na pewnej wysokości punkty odstają od linii normalnego rozkładu jako skupisko, a tych stykających z linią jest niewiele.

Na rys. 59 pokazano zależność między wartościami przewidywanymi opracowanego modelu X a wartościami obserwowanymi.



Rys. 59 Wykres wartości obserwowanych względem przewidywanych

W tablicy 38 pokazano tabelę klasyfikacji przypadków. Wartość ilorazu szans (15,556%) oznacza, że klasyfikacja jest lepsza od przypadkowej.

Tablica 38: Tabela poprawnie i niepoprawnie sklasyfikowanych przypadków (model X)

	Klasyfikacja przypadków		
	Il. szans: 15,556 % poprawnych: 80,00		
Obserw.	Przew. 0,000000	Przew. 1,000000	Procent Popraw.
0,000000	10	3	76,92308
1,000000	3	14	82,35294

Poprawność oceny z uwzględnieniem siły zastosowanej i obszaru D2 jako czynników jest równa dotychczasowej najlepszej poprawności, jednak procent niebezpiecznych prognoz wynoszący 10% sprawia, że najkorzystniejsze przewidywane występowały dla obciążenia i D1

17. Zestawienie tabelaryczne opracowanych modeli

Tablica 39: Zestawienie tabelaryczne opracowanych modeli (regresja wieloraka)

Nr	Nazwa	Postać modelu	Współczynniki dopasowania modelu			SW-W	p	Uwagi
			R	R ²	R ² popr.			
1	MODEL I	$tz = 537,3 - 596,2 \cdot Ob$	0,5	0,25	0,22	0,9292	0,04	Założenie o normalności reszt nie zostało spełnione $\alpha=0,05$
2	MODEL II	$tz = 664,5 - 776 \cdot Ob$	0,49	0,24	0,21	0,97	0,25	Założenie o normalności reszt spełnione $\alpha=0,05$
3	MODEL III	$tz = 797 - 57,2 \cdot Fz$	0,55	0,30	0,28	0,97	0,46	Założenie o normalności reszt spełnione $\alpha=0,05$
4	MODEL IV	$tz = 1310 - 1590 \cdot Ob - 140 \cdot D2$	0,77	0,60	0,57	0,95	0,20	Założenie o normalności reszt spełnione $\alpha=0,05$
5	MODEL V	$tz = 1354 - 65,5 \cdot El - 101 \cdot Fz + 112,8 \cdot D1$	0,78	0,61	0,57	0,99	0,95	Założenie o normalności reszt spełnione $\alpha=0,05$

Tablica 40: Zestawienie tabelaryczne opracowanych modeli (regresja logistyczna)

Nr	Nazwa	Postać modelu	Skuteczność prognozy "1"[%]	Skuteczność prognozy "0"[%]	Poziom bezpiecznej prognozy [%]	SW - W	p	Uwagi
1	MODEL VI	$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-15,321+(21,8227)*Ob)}{1+\exp(-15,321+(21,8227)*Ob)}$	64,70	76,92	80	0,9385	0,08	Założenie o normalności reszt spełnione $\alpha=0,05$
2	MODEL VII	$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-20,152+(1,70494)*Fz)}{1+\exp(-20,152+(1,70494)*Fz)}$	76,47	61,54	86	0,9566	0,25	Założenie o normalności reszt spełnione $\alpha=0,05$
3	MODEL VIII	$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-24,012+(35,5324)*Ob+(-2,3741)*D1)}{1+\exp(-24,012+(35,5324)*Ob+(-2,3741)*D1)}$	88,23	69,23	93	0,9730	0,62	Założenie o normalności reszt spełnione $\alpha=0,1$
4	MODEL IX	$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-31,303+(2,73615)*Fz+(-2,6974)*D1)}{1+\exp(-31,303+(2,73615)*Fz+(-2,6974)*D1)}$	64,70	84,61	80	0,9472	0,14	Założenie o normalności reszt spełnione $\alpha=0,1$
5	MODEL X	$\text{pęknięcie} = \frac{\exp(-56,2+(4,55217)*Fz+(4,99129)*D2)}{1+\exp(-56,2+(4,55217)*Fz+(4,99129)*D2)}$	82,35	76,92	90	0,9198	0,02	Założenie o normalności reszt nie zostało spełnione $\alpha=0,05$

Skuteczność prognozy '1' – procent przewidzianego zerwania próbki,

Skuteczność prognozy '0' – procent przewidzianego wytrzymania próbki,

Poziom bezpiecznej prognozy – procent prawidłowo przewidzianych prognoz 1 i 0 ogółem + nieprawidłowo przewidziane prognozy 0

18. Podsumowanie i wnioski

Regresja wieloraka

Wyznaczone na podstawie analiz statystycznych metodą regresji wielorakiej zależności (tablica 39) oraz ich graficzne interpretacje ukazują wpływ parametrów przeprowadzonych badań Constant Load na czas do zerwania próbki ze stali superduplex. Wygenerowanych zostało pięć statystycznie istotnych modeli określających *tz*, z których tylko jeden nie spełnia założenia o normalności reszt przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Należy jednak nadmienić, że jest to model I, uwzględniający jeszcze punkt znacznie odstający (punkt 14), który dla następnych modeli został usunięty.

Modele bazujące jedynie na czynnikach ilościowych (model I, II, III) charakteryzują się niskimi wartościami współczynników jakości dopasowania do warunków eksperymentu. Natomiast dla modeli, które uwzględniają dodatkowo obszar występowania pęknięcia (model IV, V) współczynniki są znacznie lepsze. W tablicy 39 zostały one zaznaczone kolorem zielonym jako modele o najlepszej jakości.

Regresja logistyczna

Utworzone na podstawie analiz metodą regresji logistycznej modele (tablica 40) opisują w jakim stopniu czynniki wykorzystane dla metody regresji wielorakiej wpływają na wystąpienie pęknięcia próbek. W tym przypadku wygenerowano pięć statystycznie istotnych modeli przy przyjętych poziomach istotności $\alpha = 0,05$ oraz $\alpha = 0,1$. Jeden model nie spełnia założenia o normalności rozkładu reszt.

Skuteczność prognozy pęknięcia opartej jedynie na czynnikach ilościowych (model VI, VII) jest mniejsza niż dla modeli uwzględniających również obszar występowania pęknięcia (model VIII, IX, X), jednak dla modeli VIII i IX poziom istotności podniesiony został do $\alpha = 0,1$. Na tablicy 40 oznaczone są kolorem żółtym jako najskuteczniejsze. Model X z założonym poziomem istotności $\alpha = 0,05$ byłby drugim najlepszym modelem pod względem przewidywania, gdyby nie fakt, że nie spełnia założenia o normalności rozkładu reszt.

Próbek poddanych rozciąganiu pod stałym obciążeniem było 31, a więc dla analiz statystycznych, zarówno metodą regresji wielorakiej jak i logistycznej, jest to mała ilość danych, która przekłada się na jakość otrzymanych modeli. Z otrzymanych wyników można sformułować następujące wnioski:

- wzrost wartości obciążenia i siły zastosowanej wpływa na spadek wartości czasu do zerwania próbki, a dla modeli logistycznych zwiększa prawdopodobieństwo pęknięcia,
- energia liniowa jest czynnikiem statystycznie nieistotnym wobec czasu do zerwania oraz występowania pęknięcia. Jedynie model V uwzględnia EI w swojej postaci, jednak jej wpływ na czas do zerwania jest niewielki,
- wykorzystanie obszarów występowania pęknięć za pomocą kodowania jako dodatkowego czynnika objaśniającego jest zabiegiem korzystnym dla jakości dopasowania modeli.

Literatura

1. Butnicki S.: *Spawalność i kruchość stali*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, 1991
2. Ćwiek J.: *Niszczenie wodorowe stali spawalnych o wysokiej wytrzymałości*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2006
3. Dobosz M.: „*Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*”. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2001
4. Ferenc K.: *Spawalnictwo*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne, 2007
5. Flis J.: *Wodorowe i korozyjne niszczenie metali: Wybrane zagadnienia*. Warszawa: Wydawnictwo PWN, 1979
6. Fydrych D.: *Materiały dydaktyczne: Technologie Materiałowe II*. Gdańsk, Politechnika Gdańska, 2012
7. Karlsson L.: *Spawanie stali odpornych na korozję – Stale duplex i superduplex*. Gliwice: Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach nr 1/99
8. Klimpel A.: „*Spawanie, zgrzewanie i cięcie metali*”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, 1999
9. Krzysztofiak M., Urbanek D.: *Metody statystyczne*. Warszawa: Wydawnictwo PWN, 1977
10. Łomozik M.: „*Metaloznawstwo i spawalność metali*”. Gliwice: Instytut Spawalnictwa w Gliwicach, 1997
11. Miśkiewicz J.: *Analityczne metody oceny spawalności stali*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2001
12. Myśliwiec M., Opartny-Myśliwiec D.: *Spawalnictwo*. Warszawa: Wydawnictwo PWN, 1981
13. Nowacki J.: *Stal duplex i jej spawalność*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, 2009
14. Piątkowski T.: *Materiały dydaktyczne: Techniki kształtowania, spajania i regeneracji*. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2010
15. Pietkun-Greber J., Janka R.M.: *Analiza skutków oddziaływania wodoru na metale i stopy*. Opole: Chemia-Dydaktyka-Ekologia-Metrologia, tom 16, 2011
16. Pilarczyk J.: „*Poradnik Inżyniera: Spawalnictwo T.1*”. Warszawa: wydawnictwo Naukowo – Techniczne, 1983
17. PN-EN 2832:2001 *Lotnictwo i kosmonautyka, kruchość wodorowa stali, badanie próbki z karbem*
18. PN-EN ISO 7539-1:2000 *Badanie korozji naprężeniowej. Metody badań. Wytyczne ogólne*
19. Przetakiewicz W., Tomczak R.: *Niektóre aspekty ferrytyczno-austenicznych stali typu duplex i superduplex*. Warszawa: Przegląd Spawalnictwa nr 3/95
20. Rabiej, M.: *Statystyka z programem Statistica*. Gliwice: Wydawnictwo Helion, 2012
21. Stanisław A.: *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 2: Modele liniowe i nieliniowe*. Kraków, Wydawnictwo Statsoft Polska, 2007
22. Surowska B.: „*Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją*”. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2002

23. Szeląg M.: *Materiały dydaktyczne: Odkrywanie wiedzy: Regresja wieloraka*. Poznań: Politechnika Poznańska, 2013
24. Śmiałowski, M.: *Wodór w stali*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, 1961
25. Świetlik K.: *Materiały dydaktyczne: Instrukcja do programu STATISTICA PL na laboratorium z ekonometrii*. Gdańsk: Politechnika Gdańska, 2011
26. Tasak E., Ziewiec A.: *Spawalność materiałów konstrukcyjnych T1: Spawalność stali*. Kraków: Wydawnictwo JAK, 2009
27. praca zbiorowa pod red. Wakulicz-Deji, A.: *Wybrane zagadnienia analizy danych*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2013
28. praca zbiorowa pod red. Walczaka W.: *Spawalnictwo: ćwiczenia laboratoryjne*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2000
29. Zieliński A.: *Materiałowe aspekty pękania korozyjnego i wodorowego*. Kielce: Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, tom 72, 2000
30. Zieliński A.: *Niszczenie wodorowe metali nieżelaznych i ich stopów*. Gdańsk: Gdańskie Towarzystwo Naukowe, 1999

Internet

31. www.argip.com.pl
32. www.ekonometria.com
33. www.e-spawalnik.pl
34. www.icd.pl
35. www.kpt.wm.am.gdynia.pl
36. www.naukowiec.org
37. www.sciaga.pl
38. www.spawalnictwo24.info.pl
39. www.spawalnictwo.blogspot.com
40. www.spawanieinfo.com.pl
41. www.statsoft.pl
42. www.wikipedia.org