

**Czasopismo Naukowo-Techniczne
Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy**

Scientific-Technical Journal of
Mechanical Engineering Faculty of UT&LS Bydgoszcz



POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ

DEVELOPMENTS
IN MECHANICAL
ENGINEERING

5(3)

2015

Wydawnictwa Uczelniane
Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
w Bydgoszczy



ZESPÓŁ REDAKCYJNY
EDITORIAL BOARD

Przewodniczący (redaktor naczelny) – Editor-in-chief – Stanisław MROZIŃSKI

Redaktorzy Działowi – Branch editors:

Eksploracja Maszyn <i>Machine Operating and Maintenance</i>	Bogdan LANDOWSKI
Inżynieria Biomedyczna <i>Biomedical Engineering</i>	Adam MAZURKIEWICZ
Inżynieria Produkcji <i>Production Engineering</i>	Marek SZCZUTKOWSKI
Mechanika i Konstrukcja Maszyn <i>Mechanics and Machinery Design</i>	Janusz ZACHWIEJA
Maszyny i urządzenia energetyczne <i>Machines and energetic devices</i>	Marcin ZASTEMPOWSKI
Transport – <i>Transport</i>	Marcin ŁUKASIEWICZ
Sekretarz Zespołu – Executive secretary	Sylwester WAWRZYŃIAK

MIĘDZYNARODOWA RADA PROGRAMOWA
INTERNATIONAL PROGRAMME COMMITTEE

Bogdan ŻÓŁTOWSKI – przewodniczący – chairman (PL – UTP)	
Maria ČZARNOGURSKÁ (SK)	Edmund DULCET (PL – UTP)
Jurek DUSZCZYK (NL)	Friedrich FRANEK (A)
Andrzej GOŁĄBCZAK (PL – PL)	Henryk HOLKA (PL – UTP)
Lidia ILIEVA-MITUTSOVA (BG)	Marian JANCZAREK (PL – PL)
Tomasz KICZKOWIAK (PL – PKo.)	Tomasz LIPIŃSKI (PL – UWM)
Ivan OBORSKI (Uk)	Dariusz OZIMINA (PL – PŚw.)
Manfred PAHL (D)	Kazimierz PESZYŃSKI (PL – UTP)
Jindřich PETRUŠKA (CZ)	Raj B.K.N. RAO (GB)
Yurij SHALAPKO (Uk)	Vasily S. SHEVCHENKO (BL)
Marian SZCZEREK (PL – ITE PIB)	Zdeněk TRÁVNIČEK (CZ)

Opracowanie redakcyjne i techniczne – mgr Michał Górecki, mgr inż. Tomasz Szałajda

Projekt okładki – mgr inż. Daniel Morzyński

© Copyright

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Bydgoszcz 2015

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

Praca powstała przy wsparciu projektu „Realizacja II etapu regionalnego Centrum Innowacyjności” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013

ISSN 2300-3383

Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego
Redaktor Naczelny: prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski
ul. ks. A. Kordeckiego 20, 85-225 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426
e-mail: wydawucz@utp.edu.pl http://www.wu.utp.edu.pl
Wyd. I. Nakład 80 egz. Ark. aut. 4,5. Ark. druk. 5.
Zakład Małej Poligrafii UTP Bydgoszcz, ul. ks. A. Kordeckiego 20

SPIS TREŚCI
CONTENTS

Marek Andryszczyk	
Biomateriały wykorzystywane do produkcji stentów – nadzieje i ograniczenia	5
Biomaterials used for the producing stents – hopes and limitations	
Łukasz Dysarski, Janusz Rak	
Pasy zębate specjalne stosowane w przemyśle	13
Special timing belts used in industry	
Marek Halenár, Michaela Jánošová, Ľubomír Hujo	
Evaluation of internal quality at manufactural corporation.....	23
Michaela Janošová, Rastislav Škulec, Marek Halenár, Ľubomír Hujo	
Report material flow in the factory real-time integrated in the Enterprise Resource Planning (ERP system)	33
Wojciech Poćwiardowski	
Wielopokładowy zataczająco-śrubowy przesiewacz wibracyjny	41
Multilayer vibrating rolling-screw screen	
Andrzej Skibicki	
Naprężenia pozostające po spawaniu krótkimi odcinkami, obliczane z zastosowaniem MES	51
Residual stresses after short-steps welding, calculated with FEM	
Ali Osman Suiçmez, Michał Piotrowski, Maciej Kotyk	
Trwałość zmęczeniowa a rodzaj połączenia spawanego stali S650MC i S700MC	59
Fatigue life and type of steel welded joint, steel S650MC and S700MC	
Maciej Templin	
Elektrownia rzeczna o małych nakładach	69
Small river power plants	

Marek ANDRYSZCZYK

BIOMATERIAŁY WYKORZYSTYWANE DO PRODUKCJI STENTÓW – NADZIEJE I OGRANICZENIA

Streszczenie: Choroby układu naczyniowo-sercowego wysuwają się na czołowe miejsce w statystyce zgonów w naszym stuleciu. Obecnie w Polsce choroba niedokrwienna serca dotyczy prawie miliona mieszkańców, a rocznie z jej powodu umiera około 90 000 ludzi. Jedną z najczęściej stosowanych metod leczenia jest angioplastyka naczyń wieńcowych za pomocą stentów. Mimo istnienia na rynku wielu rodzajów stentów nadal występuje konieczność szukania nowych technologii i materiałów zapewniających lepsze własności mechaniczne, fizykochemiczne i biomedyczne stentów.

Słowa kluczowe: stenty, biomateriały, kardiologia, miażdżycza

1. WPROWADZENIE

Termin „choroba niedokrwienna serca” (*ischemic heart disease* – IHD) określa zróżnicowany patofizjologicznie i klinicznie stan czynnościowego lub trwałego uszkodzenia mięśnia sercowego. Może być ono spowodowane zmianami strukturalnymi lub zaburzeniami czynnościowymi w krążeniu wieńcowym [17, 23].

Badania populacyjne dowiodły, że stale wzrasta częstość występowania choroby niedokrwiennej serca. Dla obywateli Polski częstość zachorowania wynosi średnio 620 przypadków na 100 tysięcy dla mężczyzn i 220 przypadków na 100 tysięcy u kobiet [11, 12, 23]. Zależy od miejsca zamieszkania (mniejsza na wsiach i większa w miastach). Częstość występowania choroby niedokrwiennej rośnie gwałtownie z wiekiem u obu płci zwłaszcza po 45. roku życia. Obecnie obserwuje się wzrost występowania tej choroby wśród osób młodych między 20. a 30. rokiem życia [3, 15].

Istota problemu dotyczy tego, że choroba dotyka czynnych zawodowo osób w średnim wieku. Powoduje to szereg oddziaływań rodzinnych, społecznych i ekonomicznych.

Uwzględniając podział czynników ryzyka, Polskie Towarzystwo Kardiologiczne, na podstawie wytycznych Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego, za najważniejsze, modyfikowalne czynniki ryzyka wystąpienia choroby niedokrwiennej uważa:

- styl życia,
- palenie papierosów,

- dieta obfitująca w kalorie i tłuszcze zwierzęce,
- czynniki fizjologiczne i biochemiczne,
- podwyższone stężenie cholesterolu, zwłaszcza LDL,
- podwyższone stężenie trójglicerydów,
- hiperglikemia lub cukrzyca,
- zwiększone stężenie homocysteiny.

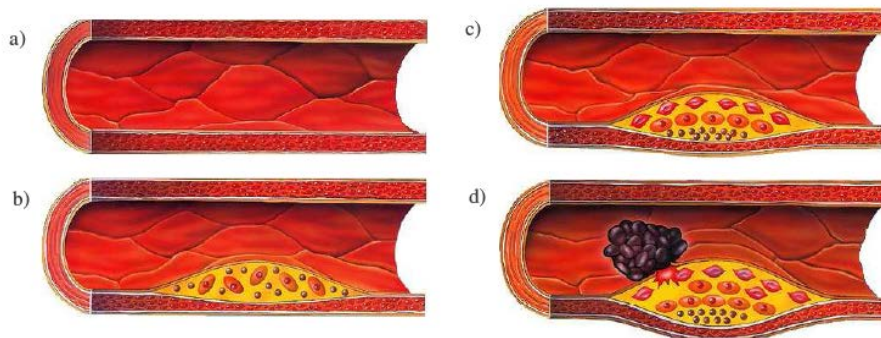
Za czynniki niemodyfikowalne, niezależne od chorego, uważa się:

- wiek powyżej 45 lat u mężczyzn i 55 lat u kobiet,
- przedwczesną menopauzę,
- chorobę innych tętnic na tle miażdżycowym [9, 22].

1.1. Miażdżyca tętnic wieńcowych

Najczęstszą przyczyną (ponad 90%) wystąpienia choroby niedokrwiennej serca jest miażdżyca tętnic wieńcowych. Przez wiele lat miażdżycę naczyń wieńcowych łączono z procesami starzenia. Dopiero badania prowadzone od połowy XIX w. dały nowe spojrzenie na patomechanizmu tego schorzenia, a najnowsze dowiodły, że zmiany miażdżycowe są wynikiem długotrwałego procesu zapalnego, pojawiającego się w ścianie naczyń w odpowiedzi na czynniki zapalne, niedotlenienie, wolne rodniki czy siły ścinające, uszkadzające komórki nabłonka [18, 22].

Powstawanie płytki miażdżycowej w tętnicach wieńcowych rozpoczyna się w momencie przenikania nadmiaru lipoprotein przez warstwę śródbłonka, tam wylapywane przez komórki immunologiczne (monocyty) włączane są w obręb włókien kolagenowych i tworzą wczesne nacieki tłuszczowe. Następnie rozpoczyna się proces migracji komórek mięśni gładkich z części środkowej naczynia do części wewnętrznej. Powoduje to powstanie nacieku komórek tkanki łącznej wokół zmiany – rysunek 1 [10].



Rys. 1. Kolejne stadia powstawania zmian miażdżycowych w tętnicach wieńcowych:
a) zdrowa tętnica, b) wczesne nacieki tłuszczowe, c) blaszka miażdżycowa,
d) blaszka miażdżycowa i zakrzep [13]

Fig. 1. The next phases of the formation atherosclerotic lesions in the coronary arteries:
a) healthy artery, b) early fatty infiltration, c) atherosclerotic plaque,
d) atherosclerotic plaque and thrombus [13]

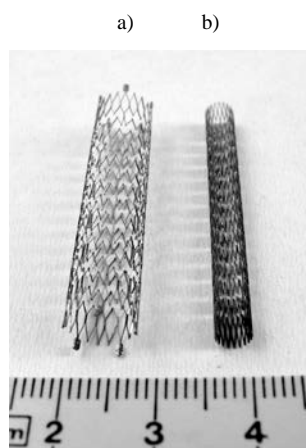
1.2. Stenty wieńcowe

W ostatnich latach rozwinęły się badania z dziedziny kardiologii, które miały na celu zmniejszenie liczby operacji na otwartym sercu. Zwiększono możliwości leczenia zabiegami małoinwazyjnymi oraz wdrażano leczenie zachowawcze (zmiana stylu życia i leczenie farmakologiczne).

Jedną z obecnie najbardziej popularnych metod leczenia choroby niedokrwiennej serca jest przeszskórna śródnaczyniowa angioplastyka wieńcowa (PTCA – *Percutaneous Trans luminal Coronary Angioplasty*). Jest to zabieg polegający na poszerzeniu zmienionego miażdżycowo odcinka tętnicy wieńcowej za pomocą zakończonego balonem cewnika, wprowadzonego w miejsce zwężenia [10, 20].

Klasyczną angioplastykę uzupełniają inne techniki z zastosowaniem różnych instrumentów, najczęściej z implantacją wewnątrznaczyniową stentów, które utrwalają efekt poszerzenia tętnicy [13].

Stenty są rodzajem metalowego, sprężystego rusztowania o przestrzennej konstrukcji walcowej i milimetrycznych wymiarach. Wszczepia się w miejsce krytycznie zwężonego odcinka tętnicy wieńcowej w celu podparcia jego ścian i zapobieganiu zwężenia światła naczynia (rys. 2).



Rys. 2. a) stent po poszerzeniu, b) stent przed poszerzeniem
Fig. 2. a) stent after enlargement, b) stent before expanding

1.3. Własności charakteryzujące implant

Skuteczność zabiegu wszczepienia stentu i wystąpienia późniejszych komplikacji zależy również od odpowiedniego dobrania własności mechanicznych i fizykochemicznych metalowych konstrukcji stentów:

- giętkości, umożliwiającej przeprowadzanie stentu przez zakręty naczyń wieńcowych i zaimplantowanie w miejscu zwężenia,
- łatwości przesuwania w cewniku i tętnicach,
- niskiego profilu stentu na balonie,

- niskiej trombogeniczności, chroniącej przed zakrzepami i nawrotami choroby,
- neutralności tkankowej,
- dobrej rozciągalności, ułatwiającej mechanizm rozprężania,
- wytrzymałości na zewnętrzne siły, zmniejszającej cykliczne rozciąganie ściany naczynia i redukującej tworzenie się komórek mięśni gładkich,
- małej całkowitej powierzchni stentu,
- dobrych własności reologicznych,
- dobrego pokrycia stentem ściany naczynia [16].

1.4. Materiały przeznaczone na stenty

Stenty wykonane są z biomateriałów, które po wprowadzeniu do układu krwionośnego nie mogą powodować zaburzeń funkcjonowania organizmu (uszkodzeń struktury białek, blokowania działania enzymów, zmian składu elektrolitu, uszkodzeń elementów morfotycznych krwi). Jednocześnie nie powinny inicjować reakcji toksycznych, mutagennych lub immunologicznych [5].

Obecnie występuje na rynku wiele stentów wieńcowych wykonanych z różnych typów materiałów; do najbardziej popularnych zalicza się:

- stal austenityczną AISI 316L (większość stentów),
- nitinol (RadiusTM, CardicoilTM, HARTSTM, ParagonTM),
- stopy platyny z irydem (AngiostentTM),
- tantal (Wiktor[®], CordisTM, StreckerTM),
- kobalt (Magic WallstentTM),
- złoto (NIROYALtm),
- polimery (fosforylocholina – DyvYsioTM stent, PTFE – Jostent[®]),
- stopy kobaltu (DriverTM, VisionTM),
- tytan (TTS) [16].

Najczęściej stosowanym tworzywem do produkcji stentów wieńcowych jest stal austenityczna kwasoodporna AISI 316L.

Austenityczne stale kwasoodporne stanowią grupę tworzyw, które najwcześniej zostały przystosowane do implantowania w organizmie ludzkim, co było nierozzerwalnie połączone z modernizowaniem składu chemicznego i fazowego.

Stale przeznaczone na implanty mają najwyższą jakość i ściśle ustalony skład chemiczny. Do głównych pierwiastków stopowych w tego typu stalach zaliczyć należy chrom, nikiel i molibden, natomiast wprowadzenie innych dodatków wpływa na przesunięcie granic występowania poszczególnych faz.

W stalach przeznaczonych na stenty wieńcowe stosunek Cr-Ni-Mo powinien wynosić około: 18% – 15% – 2,5%. W wyniku zwiększenia stężenia niklu wzrasta odporność stali na korozję naprężeniową, ponadto wysoka energia tworzenia chlorku niklu utrudnia penetrację jonów chloru do tlenkowej warstwy pasywnej. Zawartość molibdenu zwiększa odporność na korozję wżerową, podobnie jak chrom, oraz przyczynia się do wytworzenia na jej powierzchni warstw tlenkowych.

Bardzo ważnym aspektem jest rodzaj czystości i wtrąceń w tego rodzaju stali. Rodzaj wtrąceń, ich kształt, liczba oraz sposób rozmieszczenia może mieć olbrzymi wpływ na anizotropię własności mechanicznych materiału, uwidacznianą tym bardziej przy miniaturyzacji implantu [16].

1.5. Implanty odporne na restenozę

Implantacja metalowego stentu może inicjować kaskadową reakcję pomiędzy składnikami krwi a jego powierzchnią. Proces ten powoduje niebezpieczeństwo wykrzepiania krwi na powierzchni implantu sprzyjającego nawrotom zwężenia światła tętnicy wieńcowej. Metody zapobiegające takim zjawiska polegają na stosowaniu stentów pokrytych odpowiednimi lekami przeciwwskrzepowymi oraz powlekanyymi materiałami obniżającymi trombogenność lub wykonanych z materiałów niemetalowych [7].

Obecnie do najpopularniejszych należą materiały polimerowe, charakteryzujące się dobrą biotolerancją w środowisku krwi oraz atrombogennością.

Liczba gatunków polimerów syntetycznych niebiodegradowalnych stosowanych do powłok ochronnych na powierzchni stentów jest duża, a do najbardziej popularnych należą: poliuretan, silikon, politereftalan etylenu, fosforycholina [7].

W ostatnim dziesięcioleciu skupiono uwagę na polimerach naturalnych (m.in. polikwasach mlekowych, poliglikolidach, polisacharydach). Materiały te mają zróżnicowaną budowę oraz własności dzięki którym niektóre z nich ulegają biodegradacji w środowisku biologicznym. Uzyskane wyniki badań świadczą o skuteczności działania tego rodzaju aplikacji w zapobieganiu procesowi wykrzepiania, jak i restenozy [19].

Równoległe z badaniami prowadzonymi nad polimerami zaczęto wykorzystywać inne biomateriały. Koncepcja zastosowania powłok ze złota miała na celu poprawę widoczności stentów w obrazach kontrolnych. Za wykorzystaniem powłok wykonanych ze złota przemawiało ograniczenie ryzyka wykrzepiania krwi oraz obniżenie toksyczności implantu. Wyniki badań wykazały jednak, że warstwa ta może ulegać korozji w środowisku płynów ustrojowych oraz że nie zapewnia ochrony przed restenozą [6].

Nowe obiecujące wyniki badań uzyskano po zastosowaniu amorficznego węgla krzemu do pokrycia stentów wieńcowych. Wstępne wyniki wykazują dobrą odporność korozyjną w środowisku płynów ustrojowych oraz skuteczność tych powłok w ograniczaniu aktywacji płytek krwi [2, 4].

Do najważniejszych osiągnięć można zaliczyć stosowanie stentów uwalniających leki. W rozwiązaniach tych do struktury powłok polimerowych osadzonych na stentach wprowadzane są substancje atrombogeniczne i przeciwzapalne, które po umieszczeniu implantu w tętnicach są stopniowo uwalniane do krwi i tkanek naczynia. Wyniki badań klinicznych wykazują, że jest to jedno z najbardziej znaczących osiągnięć w kardiologii zabiegowej. Leki stosowane w warstwach wierzchnich stentów można sklasyfikować ze względu na sposób działania na ścianę tętnic i na cały układ krążenia wieńcowego. Najczęściej stosowanymi grupami leków są leki: antyproliferacyjne, immunosupresyjne, ha-

mujące migrację komórek, pobudzające proces gojenia i poprawiające funkcję śródbłonna, hamujące wykrzepianie [1, 8, 14].

Istnieje wiele rodzajów stentów wykonanych z różnego rodzaju biomateriałów, pokrytych lub niepokrytych lekami. Pomimo tego nadal prowadzone są liczne badania nad nowymi technologiami, zapewniającymi lepsze własności mechaniczne i fizykochemiczne stentów.

LITERATURA

- [1] ALFONSO F.: New Drug-eluting Stents: Polymer-free, Biodegradable Polymers or Bioabsorbable Scaffolds? *Rev Esp Cardiol* 6, 2013, 423-426.
- [2] ATAR E., AVRAHAMI R., KOGANOVICH Y.: Infrapopliteal stenting with silicon carbide-coated stents in critical limb ischemia: a 12 month follow-up study. *Isr Med Assoc J* 10, 2009, 611-614.
- [3] BEDNARKIEWICZ I.: Epidemiologia chorób układu krążenia. *Polskie Towarzystwo Kardiologiczne*, 2004, 10-20
- [4] DAHM J.B., WILLEMS T., WOLPERS H.G.: Clinical investigation into the observation that silicon carbide coating on cobalt chromium stents leads to early differentiating functional endothelial layer, increased safety and DES-like recurrent stenosis rates: results of the PRO-Heal Registry (PRO-Kinetic enhancing rapid in-stent endothelialisation). *EuroIntervention* 4, 2009, 502-508.
- [5] DAVID F.: Definitions in biomaterials: proceedings of a consensus conference of the European Society for Biomaterials. Elsevier, London, 1986.
- [6] EDELMAN E.R., SEIFERT P., GROOTHUIS A.: Gold-coated NIR stents in porcine coronary arteries. *Circulation* 103, 2001, 429-434.
- [7] GABRYEL J., OCHAŁA A., WOJAKOWSKI W.: Mechanizmy zapalne a restenoza po zabiegach implantacji stentów metalowych i uwalniających leki. *Postępy w Kardiologii Interwencyjnej* 1, 2009, 41-46.
- [8] GARG S., BOURANTAS C.: New concepts in the design of drug-eluting coronary stents. *Nat Rev Cardiol* 10, 2013, 248-260.
- [9] Grupa robocza 2008 Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego do spraw rozpoznania i leczenia ostrej oraz przewlekłej niewydolności serca działająca we współpracy z Sekcją Niewydolności Serca i Europejskim Towarzystwem Intensywnej Opieki Medycznej pod przewodnictwem and K. Dicksteina. Wytoczne 2008 Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego dotyczące rozpoznania i leczenia ostrej oraz przewlekłej niewydolności serca. *Kardiologia Polska* 66, 2008, suplement 4.
- [10] HIKMAT H., MADŽITOW D.A.: Ocena skuteczności leczenia pierwotną angioplastyką wieńcową chorych z ostrym zawałem serca z przetrwałym uniesieniem odcinka ST na podstawie analizy krzywej EKG. *Postępy w Kardiologii Interwencyjnej* 7, 2011, 292-296.
- [11] JAKUBOWSKA-NAJNIGIER M., PIĄTKOWSKI R.: Epidemiologia niewydolności serca. *Terapia* 9, 2008, 4-5.
- [12] KARASEK D., KUBICA A., SINKIEWICZ W.: Epidemia niewydolności serca – problem zdrowotny i społeczny starzejących się społeczeństw Polski i Europy. *Folia Cardiologica Excerpta* 3, 2008, 242-248.
- [13] MARCINIAK J.: Stenty w chirurgii małoinwazyjnej. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2006.
- [14] MULUKUTLA S.R., MARROQUIN O.C., VLACHOS H.A.: Benefit of long-term dual anti-platelet therapy in patients treated with drug-eluting stents: from the NHLBI dynamic registry. *Am J Cardiol* 4, 2013, 486-492.
- [15] MURRAY C.J., KULKARNI S.C., EZZATI M.: Understanding the coronary heart disease versus total cardiovascular mortality paradox: a method to enhance the comparability of cardiovascular death statistics in the United States. *Circulation* 113, 2006, 2071-2081.

- [16] PATRICK W. SERRUYS.: Handbook of Coronary Stents; fourth edition. CRC Press, London 2001.
- [17] PODOLEC P., JANKOWSKA E., PODOLSKI P., BANASIAK W.: Przewlekła niewydolność serca. Medycyna Praktyczna 55, 2009, 61-64.
- [18] SNARSKA B.: Choroba niedokrwienna serca w populacji województwa Łódzkiego. Polski Przegląd Kardiologiczny 4, 2003, 437-442.
- [19] STEFANINI G.G., KALESAN B.: Long-term clinical outcomes of biodegradable polymer biolimus-eluting stents versus durable polymer sirolimus-eluting stents in patients with coronary artery disease (LEADERS): 4 year follow-up of a randomised non-inferiority trial. Lancet 378, 2011, 1940-1948.
- [20] SZKUTNIK M, FISZER R.: Przeznaczyniowe poszerzenie koarktacji aorty za pomocą balonowej angioplastyki i/lub implantacji stentu – doświadczenia własne. Postępy w Kardiologii Interwencyjnej 6, 2010, 1-6.
- [21] SZWED A.: Patogeneza miażdżycy i występowania zdarzeń wieńcowych. Postępy Nauk Medycznych 1, 2002, 2-6.
- [22] Wytyczne ESC dotyczące postępowania w stabilnej chorobie wieńcowej. Polskie Towarzystwo Kardiologiczne, 2013.
- [23] ZIOŁKOWSKI M., KUBICA A., SINKIEWICZ W.: Zmniejszanie umieralności na chorobę niedokrwieną serca w Polsce – sukces terapii czy prozdrowotnego stylu życia? Folia Cardiologica Excerpta 4, 2009, 265-272.

BIOMATERIALS USED FOR THE PRODUCING STENTS – HOPES AND LIMITATIONS

Summary: Diseases of the cardiovascular system have a high position in the statistics of deaths in our century. Now in Poland, ischemic heart disease affects almost a million people and per year die of about 90,000. One of the most commonly used treatment methods is the coronary angioplasty with the stents. Existence many types of stents, but still need to look for new technologies and materials to ensure better mechanical properties, physico-chemical and biomedical stents.

Key words: stents, biomaterials, cardiology, atherosclerosis

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

5(3)/2015, 13-21

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Łukasz DYSARSKI, Janusz RAK

PASY ZĘBATE SPECJALNE STOSOWANE W PRZEMYSŁE

Streszczenie: W pracy przedstawiono stan rozwoju pasów zębatach specjalnych stosowanych w różnych dziedzinach przemysłu, jak również rosnące obszary zastosowań otwierające nowe możliwości dla producentów i użytkowników maszyn.

Słowa kluczowe: pas zębata, przemysł, pokrycie, guma, PVC, poliuretan

1. WPROWADZENIE

Pasy zębata specjalne (zaliczane do grupy elastycznych napędów) stały się bardzo ważnym elementem maszyn, stosowanych w zautomatyzowanych liniach produkcji zakładów przemysłowych na całym świecie.

Przez długie lata podstawowym zadaniem pasów zębatach (zwanymi również synchronicznymi) było przeniesienie siły z napędu wału czynnego na bierny, poprzez sprzężenie kształtowo-cierne pasa z kołem zębatach. Obserwuje się dynamiczny rozwój nowych zastosowań pasów zębatach, wykonujących różnorodne synchroniczne funkcje transportujące, zastępujących coraz częściej taśmy transportujące. Ich zastosowanie rozszerza możliwości automatyzacji linii technologicznych. Podnoszą się możliwości produkcyjne oraz zwiększa się wydajność i efektywność. Produkowane towary uzyskują powtarzalność, co przekłada się na stabilizację jakości i zmniejszenie odpadu produkcyjnego.

Celem pracy było przedstawienie, uporządkowanie oraz ocena budowy i eksploatacji pasów zębatach specjalnych, pokrytych warstwami funkcjonalnymi, ze względu na zastosowania w przemyśle.

Celem dodatkowym było przybliżenie technik nanoszenia warstw, powłok funkcjonalnych na grzbiet pasa zębatach oraz scharakteryzowanie cech materiałowych pokryć.

2. BUDOWA I ZASTOSOWANIE PASÓW ZĘBATYCH SPECJALNYCH

Pierwsze wzmianki o elastycznych napędach sięgają 1830 roku, gdy powstały pasy płaskie wykonane z elementów gumowych. Przekazywanie napędu odbywało się przy dużych wielkościach sił wstępnych, co zwiększało znacznie eksploatacyjne obciążenie maszyn. Zastosowanie w kolejnych latach pasów

mgr inż. Łukasz DYSARSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, Chiorino Sp. z o.o., ul. Piękna 13, 85-303 Bydgoszcz, e-mail: lukasz.dysarski@gmail.com

dr hab. inż. Janusz RAK, Chiorino Sp. z o.o., ul. Piękna 13, 85-303 Bydgoszcz, e-mail: rak@bazafirm.pl

okrągłych wykonanych z użyciem tkanin tylko nieznacznie poprawiło warunki pracy przekładni. W 1890 roku wykorzystano po raz pierwszy pasy klinowe wykonane z kilku warstw skóry. Materiał, z którego je wykonano nie zabezpieczał jednak stałych wartości napięcia wstępnego z powodu dużej rozciągliwości skóry. Przełomowy był rok 1917, gdy rozpoczęto produkcję pasów klinowych dla przemysłu motoryzacyjnego z umieszczonymi w poprzecznym przekroju pasa kordami. Kolejne modyfikacje dotyczyły konstrukcyjnych i materiałowych zmian, w tym rozwiązań z odkrytymi bokowymi powierzchniami i poprzecznymi zębami, znacznie poprawiając możliwości nośne oraz trwałość przekładni.

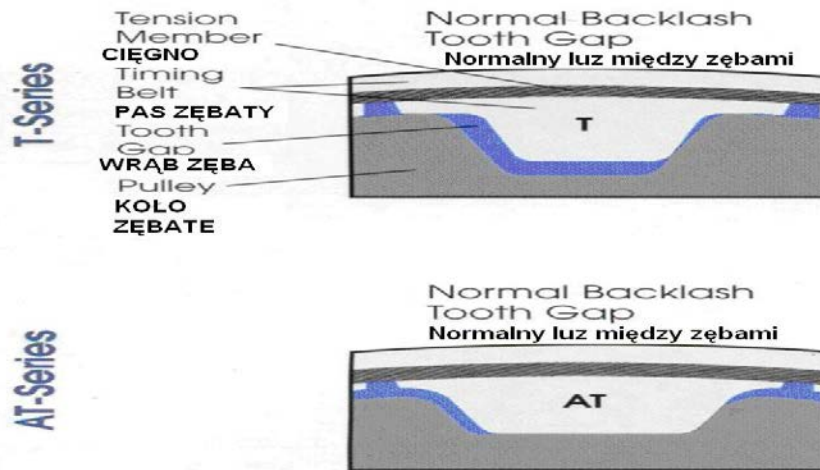
Pierwsze pasy zębate wykorzystane w maszynach do szycia wyprodukowano w USA w 1945 roku. Wykonano je z elastomeru, potocznie zwanego gumą. Z uwagi na fakt, że pierwsze konstrukcje pasów zębatych powstały w Stanach Zjednoczonych, stosowano w określeniu ich podstawowych parametrów, takich jak podziałka czy szerokość, calowy system miar. Został on znormalizowany normą DIN/ISO 5296:2012.

W oznaczeniu pasów zębatych użyto oznaczeń literowych: MXL, XL, L, H, XH, XXH, przy czym każdemu oznaczeniu literowemu przyporządkowano narastająco wielkość podziałki będącej częścią ułamkową cala. Za profil zęba przyjęto trapez współpracujący z trapezowym wrębem koła. Opieranie pasa zębatego na łuku opasania zachodzi na zewnętrznej powierzchni koła. Konstrukcja ta zapewnia kształtowe zazębienie pasa i koła, gwarantując synchronizację ruchu, wysoką sprawność, zmianę prędkości kątowej, nieznaczne wielkości siły napięcia wstępnego, niski poziom hałasu, pracę bez użycia smarów i inne.

W 1948 r. wyprodukowano pierwszy pas zębaty poliuretanowy, wzmocniony linkami nośnymi stalowymi. Trapezowy profil zęba pasa poliuretanowego oznaczono jako T. Mechanizm współpracy pasa z kołem pasowym był identyczny jak w pasach gumowych, co nie prowadziło do istotnych zmian w wielkości przenoszonych mocy przekładni.

Wprowadzenie na rynki pasa zębatego o profilu AT istotnie zwiększyło możliwości nośne przekładni, co wynika w pierwszej kolejności ze zmian wielkości profilu pasa, poprawy zazębienia w wyniku zmiany kąta pochylenia zęba, jak również ze zmian charakteru współpracy koła i pasa (opieranie zęba pasa na dnie wrębu koła). Na rysunku 1 przedstawiono zarys współpracy pasa zębatego z koła zębatym.

W kolejnych latach opracowano nowe profile HTD, STD, RTD (rys. 2), stosowane początkowo w pasach gumowych, a w późniejszym czasie i w pasach poliuretanowych. Profile tych pasów miały istotny wpływ na poprawę procesu zazębienia, zwiększając trwałości przekładni, a zwiększona masa zęba prowadziła do poprawy ich możliwości nośnych.

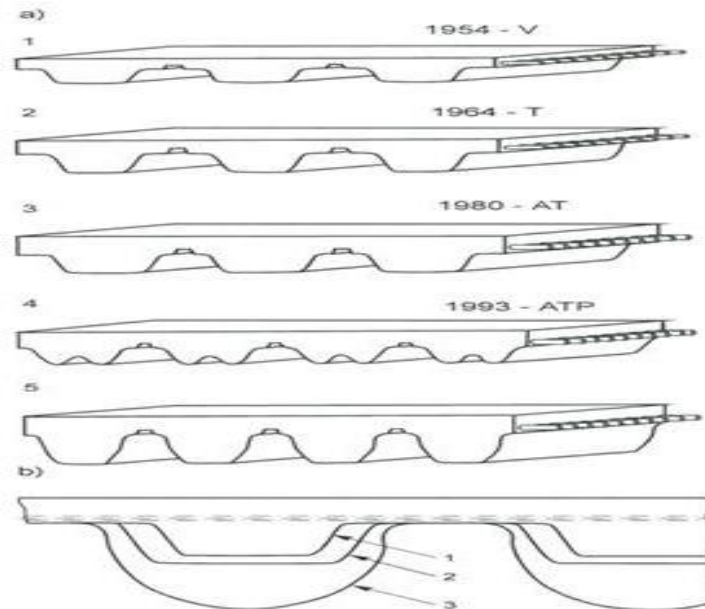


Rys. 1. Współpraca koła z pasem zębatym synchronicznym serii AT oraz T [1]
 Fig. 1. The cooperation of the gear – belt synchronous AT and T [1]

Ciekawym rozwiązaniem z początku lat 90. było wprowadzenie na rynek pasa zębatego typu ATP w poliuretanie. Zwiększenie powierzchni nośnej pasa poprzez umieszczenie w przekroju masy zęba dodatkowego wybrania współpracującego z odpowiednio ukształtowanym zarysem dna wrębu koła pasowego skutkowało dalszymi możliwościami zwiększenia przenoszonych mocy. Dalsze lata rozwoju to w pierwszej kolejności poszukiwania nowych materiałów o zwiększonej trwałości, mogących znaleźć zastosowanie w dotychczasowych profilach. Rozwiązania te zastosowano w pasach typu GT2, GT3, CXPIII, CXAIII, OmegaII, RPP Platinum czy PolyChain. Zwiększały one istotnie możliwości nośne przekładni z pasem zębatym.

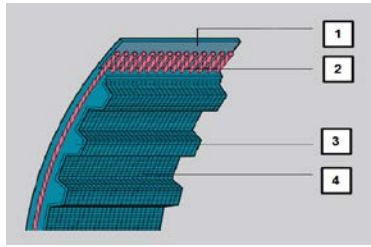
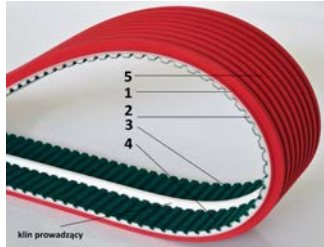
Ostatnie dziesięciolecie poświęcone było poszukiwaniom nowych rozwiązań umożliwiających wykorzystanie synchronicznej pracy przekładni z pasem zębatym w różnych dziedzinach transportu. Stronę zewnętrzną pasa zaczęto wykorzystywać do nanoszenia różnych powłok zapewniających odpowiednią przyczepność do szerokiej gamy transportowanych materiałów (rys. 2).

Pas zębaty różni się od pasa zębatego specjalnego pokrytego, jednym zasadniczym elementem. Jest to dodatkowa warstwa lub warstwy, które zostały umieszczone na grzbiecie pasa (tab. 1).



Rys. 2. Rozwój kształtu i wysokości zęba pasów synchronicznych: a) rozwój konstrukcyjny: 1 – zarys prostokątny, 2 – trapezowy, 3 – trapezowy wykonany z nowego materiału i wzmocniony kordem, 4 – podwójny ząb, 5 – ewolwentowy; b) rozwój wysokości zęba: 1 – pas o zarysie trapezowym, 2 – pas o zarysie trapezowym stosowany w silnikach spalinowych, 3 – pas o zarysie półokrągłym HTD o wyższej zdolności napędowej
 Fig. 2. Development shape and height of the tooth synchronous belts: a) the development of engineering: 1 – a rectangular, 2 – trapezoid, 3 – trapezoid made of new material and reinforced cord, 4 – double tooth, 5 – involute; b) development of tooth height: 1 – strip trapezoidal, 2 – trapezoidal belt used in internal combustion engines, 3 – strip outline HTD edging higher drivability

Tabela 1. Różnica w budowie pomiędzy pasem zębatym zwykłym a specjalnym pokrytym
 Table 1. The difference in structure between a timing belt and special covered timing belt

Budowa pasa zębatego	Budowa pasa zębatego specjalnego pokrytego
	
1 – grzbiet pasa zębatego 2 – linki nośne (kord stalowy/kewlarowy) 3 – ząb 4 – tkanina lub dodatkowe włókna	1 – grzbiet pasa zębatego 2 – linki nośne (kord stalowy/kewlarowy) 3 – ząb 4 – tkanina lub dodatkowe włókna 5 – warstwa lub warstwy różnych materiałów o funkcji transportującej

Przykładowe profile pasów zębatych:

- T5 – T10 – T20 – TK10 K13/K6
- AT3 – AT5 – AT10 – AT20 – ATK10 K13/K6, ATP 10, ATP15
- SAT10, BAT10, SAT15, SAT20
- MXL – XL – L – H – XH – XXH
- HTD3M –HTD5M – HTD8M – HTD14M
- RTD5M – RTD8M – RTD14M
- STD 3M – STD 4,5M – STD5 – STD8 – STD14
- EAGLE5 – EAGLE8 – EAGLE10 –EAGLE14

Niektóre z podanych powyżej przykładowych oznaczeń profili mogą występować w wersji podwójnie uzębionej. Pasy zębate podwójnie uzębione są dedykowane do przenoszenia wysokich momentów obrotowych w przekładniach bezluzowych.

3. METODY POKRYĆ PASÓW ZĘBATYCH I STOSOWANE MATERIAŁY

Pas zębaty specjalny pokryty składa się z pasa zębatego, na którego grzbiecie znajduje się pokrycie, zwane również nakładką lub warstwą.

Wykorzystuje się następujące metody nanoszenia pokryć na pasy zębate:

- pokrywanie na zimno (klejenie grzbietu pasa zębatego z dodatkową warstwą, np. elastomer naturalny, guma komórkowa EPDM)



Pas zębaty oraz materiał наносzony na grzbiet pasa podczas sklejania

- pokrywanie na gorąco (klejenie z użyciem gorącego strumienia powietrza, dla materiałów typu polichlorek winylu, poliuretan termoplastyczny)



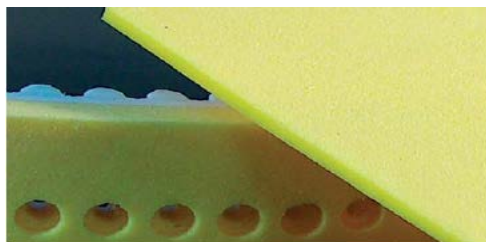
Maszyna do pokrywania pasów zębatych; na grzbiet pasa pod wpływem gorącego powietrza наносzona jest warstwa PU za pomocą ekstrudera ręcznego

- pokrywanie za pomocą wulkanizacji – wulkanizacja pasa zębatego odbywa się w autoklawie. Wypełniają go para i gorące powietrze, które wytwarzane jest przez generator pary. Na dedykowaną do długości formę nakłada się pas zębaty gumowy lub poliuretanowy, następnie nanosi mieszankę gumową w stanie przedwulkanizacyjnym. Kolejno następuje umieszczenie materiału w zbiorniku autoklawu, gdzie przy odpowiednio dobranych parametrach (tj. temperatura, czas i ciśnienie) następuje proces wulkanizacji. Po zakończonym cyklu chłodzi się materiał, a następnie przekazuje do obróbki wykańczającej (usuwanie warstwy zgorzeli)



Zbiornik autoklawu z przygotowanym materiałem do wulkanizacji

- pokrywanie przy użyciu metody sprayowania (nanoszenie powłok poliuretanowych, silikonowych, teflonowych przy użyciu pistoletu, tzw. natrysk)



Pas zębaty pokryty specjalny, w którym przy nanoszeniu nakładki na grzbiet pasa została zastosowana metoda sprayowania

Istnieją następujące rodzaje materiałów stosowanych na pokrycia pasów zębatych [2]:

a) pokrycia z materiałów komórkowych

Pokrycia wykonane z pianki elastomerowej lub poliuretanowej są łatwo ściśliwe, dzięki komórkowej strukturze materiału. Najczęściej znajdują zastosowanie w przemyśle szklarskim i papierniczym, przenośnikach podciśnieniowych, systemach etykietarek, transporcie lekkich i kruchych produktów (tab. 2).

Pasy zębate specjalne stosowane w przemyśle

Tabela 2. Pokrycia z materiałów komórkowych stosowane na pasach zębatych specjalnych
Table 2. Covering material – cellular for special timing belt

Nazwa	Materiał	Kolor	Twardość [ShA]	Odporność temperaturowa	Odporność na oleje i tłuszcze	Atest spożywczy	Współczynnik tarcia
CELLOFLEX	mikrokomórkowy elastomerowy poliuretan	żółty brązowy	–	+80°C	średnia	nie	0,3
POROL	guma komórkowa	czarny	15	+70°C	średnia	nie	1,0
PU YELLOW 50	poliuretan	żółty	50	+70°C	wysoka	nie	0,4
PU YELLOW 70	poliuretan	żółty	70	+80°C	wysoka	nie	0,3
Sylomer niebieski	elastomerowy poliuretan	niebieski	–	+70°C	średnia	nie	0,5
Sylomer zielony	elastomerowy poliuretan	zielony	–	+70°C	średnia	nie	0,5
Sylomer brązowy	elastomerowy poliuretan	brązowy	–	+70°C	średnia	nie	0,5

b) pokrycia z materiałów PVC oraz PU

Polichlorek winylu (PVC) ma wysoki współczynnik tarcia i wysoką odporność na działanie kwasów.

Ze względu na swoją uniwersalność jest stosowany w przemyśle ceramicznym, szklarskim oraz papierniczym, systemach oznakowania oraz pakowania. Niektóre rodzaje PVC mają atest spożywczy i są stosowane w tej branży na każdym etapie produkcji.

Spośród wszystkich materiałów syntetycznych i mieszanek gumowych poliuretan (PU) zapewnia najlepszą odporność na ścieranie. Pokrycia poliuretanowe różnej twardości używane są do pokrywania pasów. Materiał ten idealnie odnajduje swoje zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, np. procesie obróbki drewna, ceramiki i szkła oraz w przemyśle spożywczym (tab. 3).

Tabela 3. Pokrycia z materiałów PVC i PU stosowanych na pasach zębatych specjalnych
Table 3. Covering material – PVC and PU for special timing belt

Nazwa	Materiał	Kolor	Twardość [ShA]	Odporność temperaturowa	Odporność na oleje i tłuszcze	Atest spożywczy	Współczynnik tarcia
FISHBONE PU	PU	transparentny	70/85	+70°C	średnia	nie	0,7
AVAFC	PU	transparentny	85	+70°C	wysoka	nie	0,7
PVC Zielony	PVC	zielony	60	+90°C	wysoka	nie	0,9
Supergrip zielony PVC	PVC	zielony	50	+90°C	wysoka	nie	0,9
Supergrip czerwony PVC	PVC	czerwony	50	+80°C	średnia	nie	0,9
PVC BIAŁY	PVC	biały	60	+90°C	średnia	tak	1,0
Supergrip 12 czerwony PVC	PVC	czerwony	50	+80°C	średnia	nie	0,9

c) pokrycia z materiałów elastomerowych

Do pokrywania pasów stosowanych jest wiele różnych materiałów gumowych syntetycznych i naturalnych.

Dzięki wysokiemu współczynnikowi tarcia i odporności temperaturowej, elastomery znajdują zastosowanie w: przemyśle papierniczym, ceramicznym, obróbce drewna, przemyśle szklarskim, systemach pakujących, systemach transportowych korzystających z podciśnienia (tab. 4).

Tabela 4. Pokrycia z materiałów gumowych stosowanych na pasach zębatych specjalnych
Table 4. Covering material – rubber for special timing belt

Nazwa	Materiał	Kolor	Twardość [ShA]	Odporność temperaturowa	Odporność na oleje i tłuszcze	Atest spożywczy	Współczynnik tarcia
SUPERGRIP GUMA	guma naturalna	zielony	50	+80°C	niska	nie	1,0
LC-G	guma naturalna	czerwony	45	+90°C	niska	nie	1,1
LINATRILE	guma nitylowa	pomarańczowy	55	+110°C	średnia	nie	1,0
NITRILE	guma nitylowa	czarny	65	+110°C	wysoka	nie	0,7
CORREX	paraguma	brązowy	40	+60°C	niska	nie	0,6
Biała guma NR	guma naturalna	biały	60	+90°C	wysoka	tak	0,
Biała guma	guma	biały	60	+90°C	średnia/niska	nie	0,7
VITON	kauczuk fluorowy	czarny	75	+275°C	wysoka	nie	0,7

d) pokrycia z materiałów specjalnych

W tej grupie znajdują się skrajnie różne materiały znane w przyrodzie i technice, a mianowicie: mieszanki termoplastyczne, guma silikonowa, silikon, termoplastyczne mieszanki gumowe, skóra naturalna i sztuczna oraz teflon (tab. 5).

Tabela 5. Różne pokrycia z materiałów specjalnych stosowane na pasach zębatych specjalnych
Table 5. Special backings for special timing belt

Nazwa	Materiał	Kolor	Twardość [ShA]	Odporność temperaturowa	Odporność na oleje i tłuszcze	Atest spożywczy	Współczynnik tarcia
APL	mieszanka termoplastyczna	purpurowy	55	+60°C	wysoka	nie	0,70
SILIKON	guma silikonowa	transparentny/biały	30	+200°C	wysoka	nie	1,00
SILIKON FDA	guma silikonowa	niebieski	30	+220°C	wysoka	tak	1,10
Skóra chromowa	skóra	szary/brązowy	–	+80°C	wysoka	nie	0,80
TZ PAR	teflon	czerwony	–	+80°C	wysoka	nie	0,18
TECHNOGUM 50	termoplastyczna mieszanka guma	czerwony	50	+80°C	wysoka	nie	0,70
TECHNOGUM 70	termoplastyczna mieszanka guma	czerwony	70	+80°C	wysoka	nie	0,60

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono obecny stan wiedzy na temat pasów zębatych pokrytych specjalnych. Zostały zdefiniowane metody nanoszenia różnych powłok na cięgna zębate oraz określone grupy materiałowe stosowane na grzbiecie pasa. Funkcja transportująca pasów zębatych specjalnych w ostatnich latach stała się podstawową cechą przy przenoszeniu elementów w zakładach produkcyjnych.

Obecnie producenci pasów zębatych inwestują w rozwój pasów specjalnych, poprzez szereg badań nad nowymi materiałami. Spowodowane jest to oczekiwaniami producentów maszyn i zakładów produkcyjnych.

Cel główny i dodatkowy pracy zostały zrealizowane. Przedstawiono oraz uporządkowano informacje dotyczące stanu budowy pasa zębatego specjalnego pokrytego. Przybliżono techniki nanoszenia warstw oraz powłok funkcjonalnych na grzbiet pasa zębatego oraz przedstawiono materiały pokryć (warstw transportujących) i podano ich cechy. W kolejnych pracach zostaną przedstawione wstępne badania wpływu cech geometryczno-konstrukcyjnych pasów zębatych specjalnych na charakterystyki użytkowe. Będzie poruszona problematyka funkcji transportującej cięgien, rozpatrywana ze względu na eksploatację.

LITERATURA

- [1] Katalog firmy Brecco.
- [2] Katalog firmy Chiorino.
- [3] Katalog firmy Elatech.
- [4] Katalog firmy Gates.
- [5] RAK J., DOMEK G.: Nowoczesne przekładnie z poliuretanowym pasem zębatym. Seminarium Naukowe Napędy '96, Politechnika Gdańska, 1996.
- [6] RAK J., DOMEK G.: Zwiększenie możliwości nośnych przekładni z pasem zębatym. Konf. Projektowanie, stosowanie i eksploatacja elementów maszyn oraz urządzeń z tworzyw sztucznych, Politechnika Częstochowska.
- [7] RAK J., KOSATSCHESKI G.: Klassifikation der Leistung wichtiger Treibriemen nach Drehzahl und Scheibendurchmesser. Maschinenmarkt 26, Wurzburg, 1990.

SPECIAL TIMING BELTS USED IN INDUSTRY

Summary: The article presents the state of development of the special timing belts used in various industries. The area of applications is steadily increasing and creates new possibilities for manufacturers.

Keywords: special timing belts, industry, cover, rubber, PVC, PU

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

5(3)/2015, 23-32

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Marek HALENÁR, Michaela JÁNOŠOVÁ, Ľubomír HUJO

**EVALUATION OF INTERNAL QUALITY
AT MANUFACTURAL CORPORATION**

Summary: This work is focused on evaluation of internal quality in manufactural corporation. Huhn PressTech Ltd. is a company producing metal products as results of pressing process, construction units and other components used in automotive industry. The aim of the article is to review the process of internal quality evaluation method on daily basis. Constantly growing demand on metal chipless machining replaces the older chip`s technology. This paper aimed to clarify, how the company performs fault evaluation and what is done for their correction. To explain the procedure of evaluation in detail and demonstrate the solution, there were artificially made parts 3333 and 5555 in the company. The result is called Quality Alert.

Key words: pressing, internal quality, Quality Alert

1. INTRODUCTION

Huhn PressTech Ltd. is a subcompany of Heinrich HUHNS GmbH + Co. KG, German company. The group of Huhn is one from leading producers of metal shaped units and constructional components. It makes diverse sheet-metal dimensional components as self-sustaining components or constructional components used in different areas of industry. These components are mainly implemented in automobile industry and related supply chain.

The company was established in 1912 in Dieringhause by Heinrich Huhn. He took a machine shop over and established the foundation of the company on steel products with own manufactory workshop. Later, the company started producing iron-plated pressing components for bikes and motorcycles. Since 1936, the company has taken place in Drolshage and it has blossom into the modern company intended on shaping techniques and metal formed parts. Currently, HUHNS employs over 400 employees.

By establishing of Slovak subcompany Huhn PressTech Ltd. in 1995 (Vráble, Slovakia), it has begun a new international era for HUHNS company. This affiliated company is geographically situated on the east of valuable location near by customers from Middle and Eastern Europe. Departments of the company are divided into the four sectors: leadership, producing, quality

Ľubomír HUJO, Slovenska Polnohospodarska Univerzita v Nitre Technicka Faculta, Katedra Dopravy a manipulacie, e-mail: lubomir.hujo@uniag.sk

Marek HALENÁR, Michaela JÁNOŠOVÁ, Slovenska Polnohospodarska Univerzita v Nitre Technicka Faculta, e-mail: lubomir.hujo@uniag.sk

and maintaining. There are production lines types Raster 250t, Raster 400t, Raster 630t, Schuler SDT630, MW 800 in the workplace. There is an infrastructure for 9 transfer automatic pressing machines to 800 tons and for the length of the table up to 5 meters. The philosophy of the company Huhn PressTech Ltd. is „zero-fault“, in aspect of interpretation of internal quality. The aim of presented paper is to determine how the company interprets faultiness of products and how is the methodology for its correction to for future.

2. MATERIAL AND METHODS

The date code is an identification used for tracing of date of manufacturing and the shift which produced the product. The tracing of date code is as following: on the 1st and the 2nd place is the number of calendar week, the 3rd place means the shift (there are actually three shifts in the company) and the 4th place means the year of product manufacturing. At the beginning of the shift, the worker is commissioned for setting up the date code according to the Tables 1 and 2. Example of the date code (DK): 06DE – 06 calendar week, D – Tuesday, the 1st shift, E – the year 2015.

Table 1. Identification of the shift

	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
1. Shift	A	D	G	L	Q	U	X
2. Shift	B	E	J	N	R	V	Y
3. Shift	C	F	K	P	T	W	Z

Table 2. Identification of the year

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
A	B	C	D	E	F	G	H	I

According to the date code, it is possible to find out the fault product, the shift which made it in and the worker who is responsible for its production. The company manages strict evidence of attendance and the analysis of workers working with specific pressing machines. There are always two workers working with pressing machine. A machine operator is the person who is responsible for setting up and running of pressing machine. The second responsible person is an assistant of operator who removes produced units from conveyor, provides the first control and moves finished units into storage. Operators are trained for mistakes detection during the first control through the Quality Alert (current mistakes of manufacturing). These are the results of interpretation of internal quality + catalogs of mistakes (all of known mistakes of the design). If the operator detects one of possible mistakes (Tab. 3), he marks the chalk troop by the red card and the chalk troop is controlled by 100% control, so called blocking procedure.

Evaluation of internal quality at manufactural corporation

Table 3. The mistakes of accessories

1	Accessories from merging
2	Burr
3	Deformation
4	Cracks
5	Scoring
6	Fingerprints
7	Contamination
8	Rust
9	Missing operation
10	Failure operation
11	Fault of material
12	Fault of surface

On the place of 100% control, a worker accomplishes in-depth control of every piece in the chalk troop and books the data into the system such as: the date of control, the name of operator, operation before 100% control, the number of palette before control, the date code, the type of mistake with the number of founded faulted pieces, also the information about marking of chalk troop by red card, the number of palette after control, number of checked units, subsidiary information. Example of electronic report can be seen on Table 4.

Table 4. Electronic report of 100% control

Date	Operator		Operation after	No. of storage before control	Date code	Fault	Card	Fault on card	No. of storage after control	No. of checked units	Note
25.3.2015	Halenár	-	pressing	44444	12E E	Cracks	10	Red	44445	360	packaging
25.3.2015	-	Halenár	pressing	55555	12E E		0	None	55556	360	packaging

Workers of 100 % control have to also fill in the evidence of income and outgo at the workplace. They have to manually fill in the information about the name of product, the number of product, the number of checked units, the number of faulted pieces, the day of control and signature of operator. Example of income and outgo evidence can be seen on Table 5.

Table 5. Evidence of income and outgo at the workplace of 100% control

Income of 100% control			Outgo 100% control		
Name	Number	Amount	Produced	Reclaim	Scrap metal
Cover	7803	1099	960		139

Products are made on transferred and processed machines. On transfer machines, there are units moved along the transfer on production line type Raster 630t. The example of a big unit is in Fig. 1. The small pieces, such as

control lever or cable support, are made by processed machines. The example of a small piece is in Fig. 2.



Fig. 1. Cover



Fig. 2. Control lever

2.1. Method for evaluation of internal quality

Method for evaluation of internal quality is divided into the six steps:

1st step: Capturing data from production

It is necessary to be units produced in required day copied to the tables of production to evaluate *ppm tables*. It is needed to distinguish units made of aluminum, steel or if it is just a small piece (control levers etc.) The *ppm* (parts per million) is the way how to express fraction by means of a full number, similarly as percents. For example, 85 ppm expresses 0.000085 ($85 \cdot 10^{-6}$) that means 0.0085%, so $1\% = 10\,000$ ppm. In methodology for evaluation of internal quality, it is an indicator of faultiness. In the car industry, *ppm* is used to express quality of supply – how many faultily units were produced in 1 million of produced units.

It was chosen steel units from Table of production (Tab. 6) and copy to the Table of PPM STEEL. If it is not possible to define a material (aluminum/steel), it has to be found out the unit on the List of components (Fig. 3). It can be also searching on the drawing of specific unit where is written prescribed material.

Evaluation of internal quality at manufactural corporation

Table 6. Table of production

Name	Material	Pressing machine	Component	Date	Change	Order	Date code	Produced by	i.O	commotion
Bed	Steel	MW800	2222	28.3.2015	1	1111111	09AE	Halenár	10026	0
Bed	Steel	MW800	3333	28.3.2015	2	2222222	09BE	Halenár	4815	0
Bed	Steel	MW800	4444	28.3.2015	2	3333333	09BE	Halenár	1417	20
Cap	Steel	MW800	5555	28.3.2015	3	4444444	09CE	Halenár	7500	10
Cap	Aluminum	MW800	6666	28.3.2015	1	5555555	09DE	Halenár	2780	0

Adjustment	Detection	Burr	Deformation	Crack	Scoring	Fingerprints	Contamination	Rust	Failure Operation	Missing operation	Dimension	Cast	Red code
0												6986565	
0												5656565	yes
20												6256111	
0						10						6555555	yes
0												6565565	

Tool number	Storage place	Order	Step	Step in SAP	Equipment	Part	Part name	Material
111111		1	Trans. 1. 2. 3. 4.	444444	555555	02322-2222.1	Bed	Steel
9999		2	Trans. 1. 2. 3. 4.	666666	777777	02322-4444.1	Cap	Aluminu

Fig. 3. List of components

2nd step: Capturing data from 100% control

It is necessary to found out the type of units, the number of units, the kind of fault and the date code of units which were scraped from Electronic report of 100% control (Tab. 4). It is needed to use notes from Evidence of income and outgo at the workplace of 100% control (Tab. 5). Data are written to the Table of ppm production evaluation. It is very important to realize that the number of storage before control is different to the number of storage after control. It helps to better orientation in stock holding and faster searching for the components.

The Table of PPM is different for steel, aluminum and small pieces. It is divided to the three parts – the left side is the same for all of three parts. Here are just production data. On the right side of the table (Tab. 7), there are booked individual faults deducted from Electronic report of 100% control (Tab. 4). It is important to fill up the date for better searching. On the left side of the table (Tab. 9), there is red color at ppm because tables are adjusted to allowed number of faults. Whole table of middle part of PPM STEEL is on Table 8.

Table 7. Right side of the Table PPM STEEL

Date of control	Component	DK	Burr	Def.	Crack	Scoring	Finger-prints	Contamination	Rust	Failure o.	Missing o.	Dimension
	2222	09AE										
28.3.2015	3333	09BE			6							
	4444	09BE										
28.3.2015	5555	09CE					110					

Table 8. Middle part of the Table PPM STEEL

Produced	Burr	Def.	Crack	Scoring	Finger-prints	Contamination	Rust	Failure o.	Missing o.	Dimension	ppm per change
2592	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4815	0	0	1246	0	0	0	0	0	0	0	1246
1417	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7510	0	0	0	0	15979	0	0	0	0	0	15979

Table 9. Left side of the Table PPM STEEL

Name	Material	Pressing machine	Component	Date	Change	Order	Date code	Produced by	i.O	Commotion
Bed	Steel	MW800	2222	28.3.2015	1	1111111	09AE	Halenár	10026	0
Bed	Steel	MW800	3333	28.3.2015	2	2222222	09BE	Halenár	4815	0
Bed	Steel	MW800	4444	28.3.2015	2	3333333	09BE	Halenár	1417	20
Cap	Aluminum	MW800	5555	28.3.2015	3	4444444	09CE	Halenár	7500	10

Adjustment	Detection	Burr	Def.	Crack	Scoring	Finger-prints	Contamination	Rust	Failure o.	Missing o.	Dimension	Cast	Red code
0												6986565	
0												5656565	yes
20												6256111	
0						10						6555555	yes

There are marked parts on the table, in which the assistant of operator didn't find any fault on 3333 unit. However, from previous experiences, it had suspicion that it could be faulty. The unit was marked by red color and the chalk troop was transported to 100% control. In the chalk troop of 3333 units with the date code 09BE, there were found 6 faults (cracks) during 100% control. Operators reported electronic and written reports of the fault. The evaluation can be seen on Table 7. The operator found 10 faulty units of 5555 unit. The units were marked by red color and the chalk troop was transported to 100% control. In the chalk troop of 5555 units, there were found others 110 faulty units (scoring) during 100% control.

3rd step: PPM evaluation

The units, which exceeded predefined PPM fault limit, are highlighted by red color – Table 8.

Maximal permissible value of faultiness:

- crack – 2000 ppm,
- aluminum – 20 000 ppm,
- steel – 8000 ppm.

4th step: Internal quality

The highlighted part of the table 9 (3333 – cracks, 5555 – fingerprints) are necessary to report to the Table of internal quality (Fig. 4). It is written to the table – the number of the unit (3333), the fault of the unit (crack), the type of pressing machine (MW 800 t), the name of the unit (head), the date of producing (28.03.2015), the date code (09BE), the name of operator (Halenár), the numbers of produced units. There are also information if the Quality Alert (Quality report + Internal complaint) will be making out, link to automatic connection to the system and re-searching for Quality Alert.

Číslo výrobku / Teil No.	Foto	Typ chyby / Fehlerart	Lik / die Presse	Skupina výrobků / Teilgruppe	Datum výroby / Fertigstellungsdatum	Datumový kód / Kodierung	Aspovědný za výrobu / Verantwortlicher für Fertigung (Arbeitsführer)	Podstatná množství / suspekta Fertigungsmenge	Počet nahodných částí / Anzahl von MO Teilen	Poznámka / Notiz	Link
3333		Trhliny	MW 800	Drh	28.3.2015	09BE	Halenár	576	6 (100% kontrola)	Vypláňuje sa QA - interná reklamácia	https://www.mercedes-benz.com/mercedes-benz/quality-alert
5555		Prstovky	MW 800	Vah	28.3.2015	09CF	Halenár	9 167	10 (FE) + 110 (100% kontrola)	Nevypláňuje sa QA - nasledujúci DK zabezpečenie	333

Fig. 4. Table of internal quality

5th step: Photo Documentation of n.i.o (nicht in Ordnung/not correct) units

Operators of pressing machines and workers of 100% control are ordered to separate units if there were found minimally 10 n. i. o. pieces of unit with the specific type of fault (burr, crack...). These pieces are separated with description (the number of unit, the amount of units), marked fault on the surface and placed nearby pressing machine (in red box) that produces this unit. On the workplace of 100% control, it is placed in the container which is given for this order. It is important to take a photo of the unit, the date code and the fault and it has to be admitted to defined cell – Fig. 5. If the unit, addressed to photo documentation of the fault, is not placed on pre-defined place, it is needed to closely specific defined fault. For example, the dialog with the operator who made the mistake or controlled it on the workplace of 100% control and report it to the cell could be useful. Examples of faults from photo documentation:



Fig. 5. Cover (crack)



Fig. 6. Lane support (deformation)



Fig. 7. Head (failure operation/unreadable DK)

6th step: Filling up the Quality report + Internal complaint

Quality report is reported for units/faults that are on Table of internal quality. If the fault is produced just on certain date code and it is not presented during the following production of the same unit, it is not needed to report the Quality report anymore. On the right side of table 4, there will be written – causality removed. If it be to the contrary, it is necessary to report the Quality Alert and distribute it (in printed or electronic form) to the all workstation. The link is inserted to the folder with Quality report. Internal complaint is reported to the crack faults. In this case, both the Quality report and Internal complaint are reported. This is kept in database of complaints and after fixing of faults, the effectivity is certified. If the unit works well, it is possible to close this complaint.

3. RESULTS

The result of internal quality process is the Quality Alert where are reported information about customer, description of produced unit, description of fault with photo documentation and the sign of drawer with the date of drawing. The drawer is in charge of operators interacting with the unit training what also important aspect for zero faultiness is.

Evaluation of internal quality at manufactural corporation


Quality Alert			
Customer	7898-85765-5485	Part name	Bed
Part no.	12345-3333	Issue	-
Concern no.	Internal notice	Special characteristics	-
Receipt date	29.3.2015		
Concern name:	Crack		
Failure effect at customer	Mismatch of customer request		
Bemerkung Pozn. : Comments	Pieces found by 100% control in HPT. Pressing machine - MW 800 t. Date of producing. - 28.3.2015 Date code - 09BE Amount n.i.O - 6ks.		
Defect description			
			
Distribution list	QS, QM, VS, FE, FEL, WB, WBL	Control instruction for DATE	production+ 100% inspection
Created by	Bc. Marek Halenár /QA		29.3.2015

Fig. 8. Quality Alert

4. CONCLUSION

For Huhn PressTech Ltd., experience is the most important assumption to develop the new products, owning to the company clears up whether and how it can be possible to manufacture new metal components. Ultimately, experience is the decisive factor for the rapid, cost-effective and process-able development. Innovative technologies are the guarantee for effective performance in development. Computer aided simulation (AutoForm System) helps to hasten the prototype phase, decrease the cost on prototype construction and generally ensures the stability of the production process. Constantly growing demand on chipless technologies replaces older chip technology. Transfer presses use pressing force from 250 to 800 tons, desks up to 4000 mm. In the machine pool of the company, there is also a modern 630 tons weighted servo press. From the

roll, the company manufactures sheet metal from 0.6 mm to 5 mm, both steel and aluminum. Already mentioned philosophy of zero faultiness achieves absolute accuracy in all areas. Skill and care of workers are also important as a modern machine pool supported by CAD and CAM technology.

This paper aimed to clarify how the company performs fault evaluation and what it does for its correction. In detail, there is explained the procedure of evaluation of internal quality and demonstrated the solution on artificially manufactured units 3333 and 5555. The result is called the Quality Alert.

REFERENCES

- [1] Company Heinrich HUHNS GmbH + Co. KG. (online): <www.heinrich-huhn.de>.

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

5(3)/2015, 33-40

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Michaela JANOŠOVÁ, Rastislav ŠKULEC, Marek HALENÁR,
Lubomír HUJO

**REPORT MATERIAL FLOW IN THE FACTORY REAL-TIME
INTEGRATED IN THE ENTERPRISE RESOURCE PLANNING
(ERP SYSTEM)**

Abstract: To ensure a flow production is always necessary to provide the inputs and outputs of materials in line with customer requirements ie. design and implement the most efficient material flow. As the basis of efficiency is considered to be straightforward and simple course, a low rate of material flow, enabling the creation of larger, integrated volume handling units with which it operates as a single piece using mechanization. Straightforward and simple course depends on optimal spatial layout of the company (production and storage buildings) as well as a series of individual operations and the appropriate organization of production. In terms of control and management of material flow is the most important right choice and tuning of the management and material flow control

Key words: ERP system, material flow, handling unit, manufacturing and warehouse space, management system

1. INTRODUCTION

In the past in the primary production were use machines that were designed for specific operations. This versatility does not avoid neither transport logistics within the farm. Transport and Manipulation Technology is currently a full-blown technical system that effectively cooperates with the production systems in the industrial sector, but is also widely used in non-industrial and non-manufacturing sectors [1].

Handling processes affect the stability and efficiency of the manufacturing process. Their objective necessity and proportion of value creation is contrary to their backwardness, which only emphasizes the primacy of the development of these processes. Handling operations are provided by removing material from the outbreak to local needs and consists of a summary of handling and auxiliary operations necessary for their implementation.

Handling operations is defined as intentionally performed continuously change the position of the subject of one device or means used in material handling or by one worker.

Michaela JANOŠOVÁ, Rastislav ŠKULEC, Marek HALENÁR, Slovenska Polnohospodarska Univerzita v Nitre Technicka Faculta, e-mail: lubomir.hujo@uniag.sk

Lubomir HUJO, Slovenska Polnohospodarska Univerzita v Nitre Technicka Faculta, Katedra Dopravy a manipulacie, e-mail: lubomir.hujo@uniag.sk

Materials Handling and transport have their identity and function in production and circulation. Choice of handling equipment has a significant impact on the efficiency of the technological process and plant operations. Therefore it is necessary that the selection is based on a thorough analysis of material flow, qualitative – quantitative characteristics of the conveyed materials and technical parameters of transport and handling and the local situation [2].

Material flow management objective is to minimize material handling. Minimizing operations are undertaken by a group of facilities and equipment (transport, shipping, lifting, etc.) Forming the support of the whole ERP system providing data records.

The selected company operates in the industrial zone in city of Vrábce since 1995 (Fig. 1). The company is a major manufacturer of metal stampings and construction units, the offer includes a variety of sheet metal molded parts as separate components or assemblies used in various fields. The products of the company concerned find use in many industries, however, mainly in the automotive industry.



Fig. 1. View of the manufacturing plant

2. METHODOLOGY OF WORK AND METHODS OF MEASUREMENTS

Objective scientific paper was to investigate the material flow volume of complete handling units, as well as incomplete handling units in real time of their creation in the manufacturing cycle time by direct flow of information in the Asset Tracking (ERP) using barcodes and barcode readers, as an interface to ERP system. Transferring the information covers the entire production, storage, shipment and distribution zone manufacturing plant. Material flow assumes the functionality of a full FIFO principle and unambiguous identification of each handling unit.

Materials Handling is therefore an integral part of the production process and addresses mainly the following specific issues:

- relations in the production process and circulation,
- methods and techniques in use in handling operations in various sectors of production and circulation,
- methods of organization and management of material handling in production processes and circulation.

Material flow together with information and financial flows provides basic image operation of logistics in the enterprise. Only high-quality information on its size, direction, frequency and so on. It allows efficient means to plan served basis without creating too much power or losses. However, the problem must be addressed comprehensively, along with other cost logistics costs and to achieve a reduction in the total cost of logistics in ensuring the required logistics services.

Own work

In addressing the issue we started from the initial state, where he created one virtual enterprise zone to records, the records of which took place on the basis of reports by heads of manufacturing them arbitrarily selected cycle, at least 1 times a day. The goods were chaotic deployed in areas of production, identification of the goods was not only based on product type and prepayments, respectively. Identification of goods in the production area was difficult and possible only based on the identification label located on the handling unit, which significantly prolonged the picking time and led to a slowdown in the overall production process.

To address the project we approached the following levels:

a) theoretical evaluation of solving the problem:

- Formulation of the problem,
- Identification of substantive system (capture the essence quantities)
- Creating an artificial system (system modeling)
- Testing and algorithm development
- Interpretative analysis.

After the theoretical evaluation address the problem we proceeded to practical solutions to the following descriptions for each step:

b) practical solution to the problem:

- Develop a standard for unambiguous identification of the handling unit
- Creating conditions and interfaces for recording goods in real time
- Identification of material flows
- The establishment of a registration virtual environment in the ERP system reflects the true material flows,
- Create a storage space, indicating the storage zones, taking into account the flow of goods.

For the unambiguous registration of the handling unit was created standard that is used as the input quantity planned order for production of a particular work. Proposal planned orders generated by the ERP system automatically taking into account the actual needs of customers in specific parts, designed production order has manager on the basis of current capacity and material available in production release for production. Production order contains data on the manufacturing process, the number of products in one handling unit and the required product. Production Order in printed form includes a bar code, which is used to generate records handling units with manufactured goods. In practice this means that, after manufacturing production worker completed handling unit under the scanner production order, which in turn made parts recorded in the ERP system in real time and unit be assigned a unique identification number under which he is registered in the ERP system, which It serves both to ensure traceability and ensure FIFO system functionality.

Tackling

In order to achieve the aim was needed at the factory breakdown for individual areas specifically demarcated zones, among which there are ongoing material flows:

- warehouse handling units packaged by the packaging regulations,
- storage of packaged handling units with fewer parts, such as packaging regulation
- area intended for the handling unit to report back to the ERP system,
- manufacture,
- area intended for the shipment of goods to customers and co-operations.

Distribution warehouse space can be seen in Fig. 2.

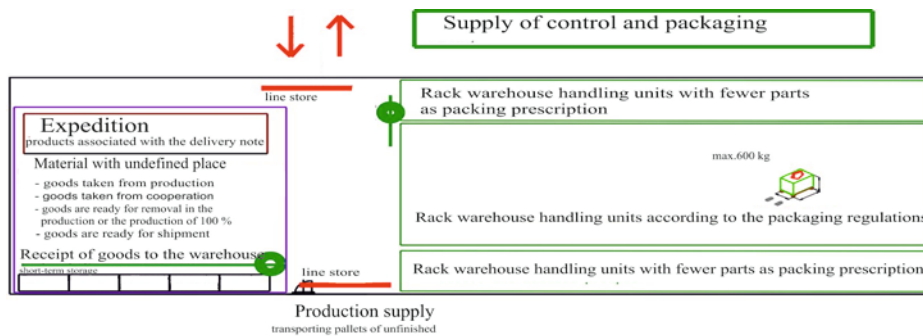


Fig. 2. Organizational division of warehouse space

Definition warehouse areas:

Storage area "material with undefined storage places".

This area of the warehouse is a purple trim and consists of open spaces and the warehouse shelves along the wall contained pressroom.

Handling units are in accordance with the undefined storage places accept only the following motions:

- poor reporting of production, respectively. 100% control of the production and packaging by scanning the contract under which they were manufactured parts,
- the adoption of the delivery note of the cooperation projects.

Parts of the area under an undefined storage places can be stored exclusively the following procedures:

- stock in bay warehouse, if it is a full pallet wrapping by regulation in the area specified for handling units packed in accordance with packing or regulation. If it is a work in progress in handling units defined for them. Stock at the handling unit is assigned a position on the store shelves;
- to dispatch in manufacturing, degreasing, or to control a pack exclusively compared to production orders by creating a transport order and confirmation of motion using a bar code reader;
- to dispatch the expedition compared to the delivery slip duly created a transport order.

On the dispatch it must be certified by the transport command.

Area bay warehouse

It is an area of storage racks designed to manage the basics of handling units (cardboard boxes, steel containers, etc.) only the packaging of full – full prescribed amount.

Parts warehouse in regálovégho accept only the following motions:

Stocking parts of the area of the warehouse undefined place in store shelves by ERP transactions and select the command "to stocking store shelves".

Parts of the area bay warehouse can be preskladnené exclusively the following procedures:

Removal on the basis of transport orders in SAP compared to the production order, the contract for inspection and packing or against the delivery note. On the dispatch it must be certified by the transport command.

Stock transfer of goods from one bay warehouse storage location to another storage location can be made only in the case where the movement is at the same time duly recorded in the ERP system through the appropriate transactions and manual confirmation of the warehouse order by scanning barcodes handling units and warehouse locations.

Area bay warehouse handling units unwrapped by the packaging regulations

It is a stationary racks standing along the walls of the warehouses, the function is identical to the field of warehouse storage rack for complete handling units with the difference that in this area zaskladňujú parts that are not packed in accordance with proper packaging regulations, ie a number of parts not corresponding quantities prescribed by the packaging regulations.

Parts in bay warehouse for incomplete handling units will be accepted only following movements:

Stocking parts of the area of material with undefined storage places in racking warehouse using ERP transactions and select the command "put away into storage racks".

Parts of the area designated for storage racking incomplete handling units can be removed from storage exclusively the following procedures:

Removal on the basis of transport orders in the ERP versus production orders, contracts for inspection and packing or against the delivery note. On the dispatch it must be certified by the transport command.

Stock transfer of goods from one bay warehouse storage location to another storage location can be made only in case, if this movement is part of a properly registered in the ERP by the corresponding transaction and confirmation of the warehouse order by scanning barcodes handling units and warehouse locations.

Warehouse area "production supply"

This store represents material provided in the production or for further refinement. The control department and packaging, or repair.

Any material that physically leave the area or bay warehouse not allocated pursuant to storage places for further processing or repair. repackaging must imperatively be reversed to the warehouse area "production supply", ie, material in production.

Parts can be reclassified in stock "production supply" just following movements:

By creating a transport order in the ERP transaction solely against the recorded production orders, respectively. contract for inspection and packaging, or repair.

Parts of the "production supply", i.e. the manufacture, inspection, packaging, or repairs can be stored back solely to the material stock material to storage places not allocated" and only following procedure:

- poor reporting of production, respectively. inspection and packaging by scanning production order based on which parts have been produced.

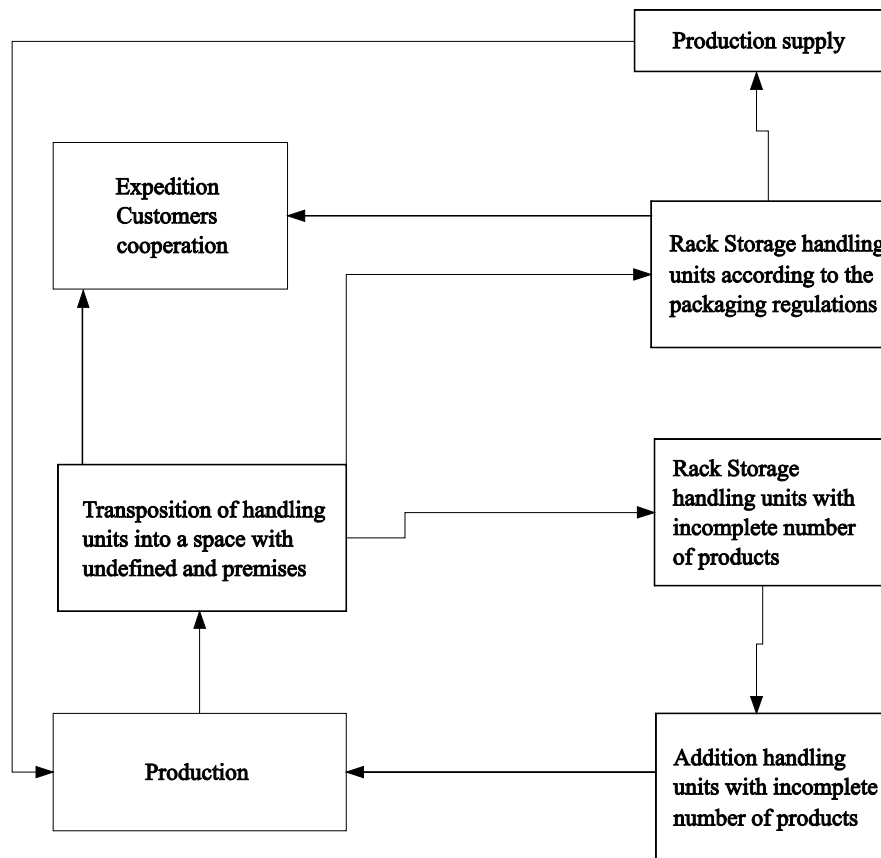


Fig. 3. Plant material flows

3. RESULTS

Economic development during this century, which is characterized by rapid growth businesses and their expansion to various markets, triggered a strong push for a coordinated and monitored movement of all material and value flows [4].

We focus on shortening the processing time, optimum distribution of work, the opportunity for automated inventory tracking, and ways to save money spent on stocks and handling processes.

Indicators of material handling salient proposals in optimization of transport – handling flows, the new proposals are intended to reduce costs in the handling, increase production capacity and not least the increase in labor productivity [1].

The goal was based on the monitoring of material flow volume of coherent and fragmented handling units, using the identifiers set at the factory specifically defined areas, among which there are ongoing material flows, the current condition monitoring of production and circulation of products to shipping.

The result of this work was the creation of the demarcated zones in Fig. 3 and material movement with a simple description. The proposed system of material flow has managed to implement in a manufacturing enterprise, which are governed by the scheme described in the section own work, to achieve continuity of the production process.

REFERENCES

- [1] JÁNOŠOVÁ M., HUJO L.: Riešenie dopravno-manipulačných tokov materiálu vo výrobnom procese. [In:] Najnovšie trendy v poľnohospodárstve, v strojárstve a v odpadovom hospodárstve, I, vyd. 1 CD-ROM (362 s.), ISBN 978-80-552-1014-8, Slovenská poľnohospodárska univerzita Nitra, 2013, CD-ROM, 157-163.
- [2] JASÁŇ V. a kol: Teória dopravných a manipulačných zariadení. 1 vydanie, Bratislava, 1989.
- [3] MOŽIŠ M., VARGA D., GRMAN L.: Profesne vzdelávanie pre potreby logistiky. Zborník medzinárodnej vedeckej konferencie AGROTECH NITRA 2001, MF SPU Nitra, 2001.
- [4] KOSIBA J., TULÍK J.: Podiel dopravnej logistiky pri prevádzke poľnohospodárskeho traktora. [In:] Viediecke stavby v európskych regiónoch II, 1. vyd. 1 CD-ROM (184 s.), Slovenská poľnohospodárska univerzita Nitra, 2014, CD-ROM, 157-160.

Wojciech POĆWIARDOWSKI

WIELOPOKLADOWY ZATACZAJĄCO-ŚRUBOWY PRZESIEWACZ WIBRACYJNY

Streszczenie: W pracy przedstawiono zasadę działania wielopokładowego przesiewacza wibracyjnego pracującego w układzie zataczająco-śrubowym z dwoma wibratorami pracującymi współbieżnie. Zmierzono tłumienia drgań przenoszonych na podstawę dla zawieszenia sprężynowego składającego się z 8, 12 i 16 sprężyn. Najwyższy wskaźnik skuteczności wibroizolacji dla drgań pionowych, wynoszący 77,7%, uzyskano dla 16 sprężyn. Dla zmiennych kątów ustawienia wibratorów względem pionu największą wydajność przesiewania uzyskano dla kątów w zakresie 35-45°. Wydajność pracy przesiewacza wielopokładowego limituje wydajność przesiewania pierwszego sita, która wynosi $5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ ($26 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$). Drogę nasion po sicie dla średnicy przesiewacza $D = 0,6 \text{ m}$ oszacowano na $L = 5 \text{ m}$.

Słowa kluczowe: przesiewacz wibracyjny, przesiewacz zataczająco-śrubowy, przesiewanie

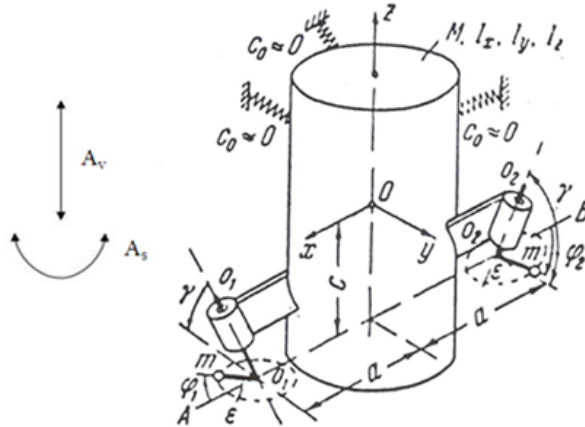
1. ZASADA DZIAŁANIA WIELOPOKLADOWEGO PRZESIEWACZA WIBRACYJNEGO, ZATACZAJĄCO-ŚRUBOWEGO

Układ wibracyjny zataczająco-śrubowy pracujący z dwoma wibratorami w układzie współbieżnym, wymusza ruch obwodowy materiału ziarnistego na sicie [1, 2, 8, 9].

Pod względem fizycznym układ zataczająco-śrubowy został szczegółowo opisany przez fizyków rosyjskich [3, 5]. Płaszczyzna wykonuje drgania względem trzech osi X, Y i Z. Na płaszczyźnie XY powstają drgania skrętne, na które składają się drgania względem osi X i osi Y powodujące poziome przesuwanie się materiału ziarnistego po spirali od środka do ścianki (As). Drgania pionowe zmniejszają nacisk na podłoże, siłę tarcia i rozluźniają złożę (Av).

Charakterystykę drgań platformy wibracyjnej w postaci sztywnej płyty opartej na sprężynach, napędzanej dwoma samosynchronizującymi się wibratorami, umieszczonymi symetrycznie po obu stronach, przedstawił Domoradzki i inni [4]. Silniki wibracyjne zamocowano na tarczach umożliwiających regulację kąta pochylenia wibratorów od 0° do 90°. Silniki wibracyjne pracują we wzajemnej współbieżnej samosynchronizacji. Samosynchronizacja polega na samoistnym wpadaniu w obroty synchroniczne dwu wałów niewyważonych, które są osadzone w jednym elemencie sztywnym. Poznanie pracy układu wibracyjnego współbieżnego z dwoma wibratorami pozwoliło na zbudowanie

wielopokładowego przesiewacza do nasion z obiegiem obwodowym ziaren na sicie. Wibratory umieszczone są symetrycznie po obu stronach kolumny sitowej przesiewacza (rys. 1).



Rys. 1. Schemat układu zataczająco-śrubowego napędzanego dwoma wibratorami wg Ławrowa [3, 5]

Fig. 1. Diagram of the rolling-screw system with two vibrators based on Ławrow [3, 5]

Dla urządzeń o drganiach wymuszonych, wskaźnikiem efektywności przekazywania drgań na podstawę maszyny względem osi XYZ jest współczynnik przenoszenia (Λ):

$$\Lambda = \frac{A_1}{A_2} \quad (1)$$

gdzie:

- Λ – współczynnik przenoszenia,
- A_1 – amplituda siły wymuszającej wibracje,
- A_2 – amplituda siły przeniesionej na podstawę maszyny.

W praktyce często posługiwano się wskaźnikiem skuteczności wibroizolacji – tłumieniem (Ψ):

$$\Psi = 1 - \Lambda \quad (2)$$

gdzie:

- Ψ – tłumienie.

Częstotliwość drgań własnych układu posadowionego na wibroizolatorach wyznaczono z uproszczonej zależności (3).

$$f = \frac{5}{\sqrt{\lambda}} \quad (3)$$

gdzie:

- f – częstość drgań własnych [Hz],
- λ – ugięcie statyczne wibroizolatorów [cm].

Wartość częstotliwości drgań własnych układu posadowionego na sprężynach oblicza się na podstawie danych doświadczalnych z zależności [6, 7]:

$$f = n \cdot \sqrt{\frac{\Lambda}{\Lambda + 1}} \quad (4)$$

gdzie:

- n – częstość wymuszająca [Hz],
- f – częstość drgań własnych [Hz],
- Λ – współczynnik przenoszenia.

2. CEL PRACY

Celem badań było sprawdzenie przydatności układu zataczająco-śrubowego z dwoma wibratorami do budowy ciągłego, wielopokładowego przesiewacza wibracyjnego. Zwrócono uwagę na tłumienie drgań przez zawieszenie sprężynowe, prędkość materiału ziarnistego na elementach przesiewacza i wydajność przesiewania ziaren przez sita. Nasiona rozdzielone na frakcje przesiewano przez kolejne trzy sita, licząc od sita, przez które przeszła dana frakcja.

3. MATERIAŁY I METODY

Badania ruchu materiału na segmencie sitowym i rozdziału materiału ziarnistego na frakcje, wykonano na drobnych kulistych nasionach roślin kapustnych, stosując sita od 0,8 do 4,0 mm, co 0,2 mm. Z sitowych analiz laboratoryjnych wiadomo, że większość nasion wymaga ok. 7 sit dla pełnego rozdziału na frakcje [4]. Nasiona rozdzielono wstępnie na frakcje: 1,0-1,2 mm; 1,2-1,4 mm; 1,4-1,6 mm; 1,6-1,8 mm; 1,8-2,0 mm.

Analizowany przesiewacz składa się z podstawy wspartej na 8, 12 i 16 sprężynach, na której zamontowano kolumnę sitową o średnicy ok. 0,60 m. Kolumnę montuje się z segmentów, między którymi umieszczane są sita i urządzenia do ich czyszczenia. Badano wydajność przesiewania sit o $D_k = 0,565$ m (D_k – średnica sit). Kolumnę zakrywa pokrywa z otworem o średnicy 50 mm dla doprowadzania materiału i otworem rewizyjnym o średnicy 160 mm. Materiał do przesiewacza podawany jest lejem na środek sita i przesuwa się od osi sita w kierunku do jego obrzeża, a następnie jest odprowadzany na zewnątrz. Wysypy odprowadzają materiał z sit do odbieralników poszczególnych frakcji. Na podstawie przesiewacza spoczywa segment dolny. Na dolnym segmencie kolumny sitowej zainstalowano dwa wibratory firmy VIBRA POL Poznań, typ BM 15-0020. Wibratory ustawiono dla 90% siły wymuszającej wibracje równej 3650 N i pod kątem 20-60°. Blok sit opiera się na sprężynach (rys. 2).



Rys. 2. Przesiewacz zataczająco-śrubowy
Fig. 2. The rolling-screw screen

4. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

4.1. Badania tłumienia drgań

Masa pustego stołu wibracyjnego ze zbiornikiem, powyżej zawieszenia sprężynowego, wynosi 120 kg. Materiał umieszczony w zbiorniku jest zawieszony razem z układem napędowym na 8, 12 i 16 sprężynach. Emisję drgań mierzono w trzech punktach pomiarowych, na pokrywie przesiewacza i na podstawie cylindrycznej (tab. 1). Pomiaru pozwalają ocenić skuteczność tłumienia sprężyn i były wykonywane SYSTEM PULSE firmy Bruel&Kjaer. Jest to platforma służąca do wielokanałowej analizy drgań w czasie rzeczywistym i umożliwia przeprowadzenie badań amplitudy, prędkości i przyspieszenia drgań układu względem osi X, Y, Z. Aparatura pomiarowa składa się z czujnika, konsoli i komputera z oprogramowaniem.

Tabela 1. Wyniki obliczeń tłumienia dla 8, 12 i 16 sprężyn
Table 1. The results of damping calculation with 8, 12 and 16 springs

Amortyzator	Oś drgań XYZ	Pokrywa A ₁ [mm]	Podstawa A ₂ [mm]	Tłumienie [%]
16 sprężyn	X 16	0,43	0,06	93
	Y 16	0,14	0,14	99
	Z 16	0,60	0,02	71
12 sprężyn	X 12	0,37	0,03	89
	Y 12	0,13	0,09	99
	Z 12	0,59	0,02	71
8 sprężyn	X 8	0,33	0,03	89
	Y 8	0,12	0,12	99
	Z 8	0,52	0,02	66

Zależność ugięcia sprężyny od siły ściskającej i opisano wzorem:

$$Y = 0,0468X \quad (5)$$

gdzie:

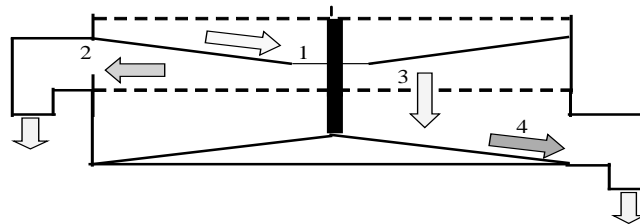
Y – ugięcie sprężyny [mm],
X – siła ściskająca sprężynę [N].

Do dalszych badań wybrano amortyzator sprężynowy z 16 sprężynami, charakteryzujący się największym współczynnikiem tłumienia względem osi $\Psi_x = 0,93$ i osi $\Psi_z = 0,71$. Tłumienie względem osi Y jest stałe i wynosi $\Psi_y = 0,99$.

4.2. Badania pokładu sitowego

Badania prowadzono w 7-pokładowym przesiewaczu wibracyjnym, o powierzchni $0,25 \text{ m}^2$ z 16 sprężynami. Prędkość obwodowa nasion na sicie przesiewacza wynosiła $0,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, amplitudy drgań na pokrywie względem osi: $A_x = 0,43 \text{ mm}$, $A_y = 0,14 \text{ mm}$, $A_z = 0,60 \text{ mm}$, kąt pochylenia wibratorów $20\text{-}60^\circ$, częstość wibracji 25 Hz , a siła wymuszająca wibracje 3650 N .

Badano elementy przesiewacza, na których ruch materiału powinien wywierać wpływ na wydajność przesiewania urządzenia (rys. 3):



Rys. 3. Ruch materiału w kasce przesiewacza: 1 – ruch nasion na leju stożkowym, 2 – ruch materiału wzdłuż sita, 3 – przesyp przez sito, 4 – ruch w kierunku wysypu
Fig. 3. Material action in a screen layer: 1 – movement of seeds in conical hopper, 2 – movement of the material along the sieve, 3 – dumping through the sieve, 4 – movement directed to way out

Badano wydajność splywu cząstek kulistych po leju stożkowym doprowadzającym materiał ziarnisty na środek sita, mierząc czas splywu znanej masy. Wydajność splywu cząstek kulistych w funkcji kąta ustawienia wibratorów przedstawiono na rysunku 4.

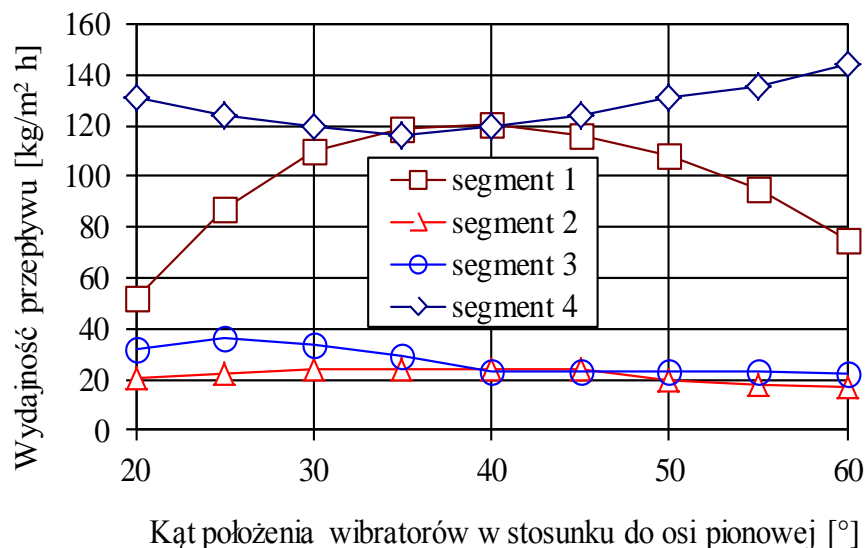
Badanie przepływu materiału ziarnistego na sicie w kierunku wysypu wykonano na zablokowanym sicie poprzez ułożenie pod sitem tarczy wykonanej z blachy bez otworów. Sito zasypywano materiałem ziarnistym aż do ustalenia równowagi. Mierzono czas splywu znanej masy ziaren. Zależność wydajności ruchu materiału po sicie w funkcji kąta ustawienia wibratorów przedstawiono na rysunku 4.

Na przesiewaczu zamontowano badane sito, a pod sitem lej do zbierania nasion które przeszły przez sito. Na powierzchnię sita wysypywano badaną frakcję i uruchamiano przesiewacz. Zmieniano kolejne frakcje nasion i kolejne sita 1,4 mm; 1,6 mm; 1,8 mm. Mierzono masę nasion, które przeszły przez badane sito i obliczano średnią wydajność przesiewania przez sito.

Jak się okazało, dla wybranej wąskiej frakcji materiału ziarnistego wpływ kąta ustawienia wibratorów na wydajność przesiewania jest nieznaczny.

Wydajność spływu materiału ziarnistego po dolnym stożku przesiewacza, odbierającym materiał z kolumny sitowej, polegały na mierzeniu czasu wysypu znanej masy materiału ziarnistego (rys. 4).

Dla zmiennego kąta położenia wibratorów wydajność ruchu materiału ziarnistego na elementach przesiewacza przeliczono na powierzchni 1 m² (rys. 4).

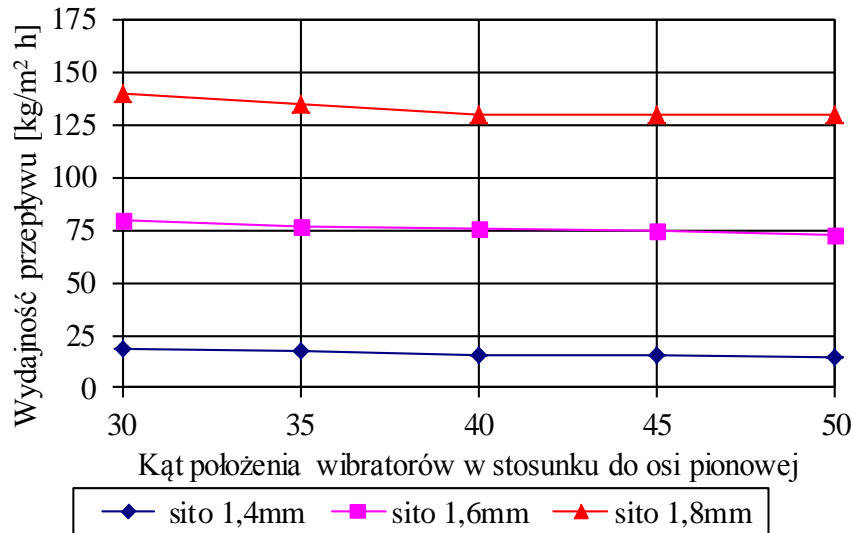


Rys. 4. Zestawienie wydajności przepływu materiału ziarnistego na elementach przesiewacza: 1 – ruch nasion na leju stożkowym, 2 – ruch materiału wzdłuż sita, 3 – przesyp przez sito, 4 – ruch do wysypu na stożku dolnym przesiewacza

Fig. 4. Comparison of granular material flow efficiency on screen elements: 1 – movement of seeds in conical hopper, 2 – movement of the material along the sieve, 3 – dumping through the sieve, 4 – movement to dump (way out) on the cone bottom screen

4.3. Wydajność przesiewania materiału przez kolejne sita

Odsiane frakcje nasion na analizowanym sicie przesiewano jeszcze raz przez to samo sito. Wydajność przesiewania materiału ziarnistego przez badane sito dla odsianych frakcji o wymiarach 1,2-1,4 mm przez sita o średnicach oczek 1,4 mm i dla kolejnych sit 1,6 mm i 1,8 mm przedstawiono na rysunku 5. Wydajność przesiewania sit niewiele się zmienia wraz ze zmianą kąta ustawienia wibratorów.



Rys. 5. Wydajność przesiewania frakcji 1,2-1,4 mm dla sit z otworami o średnicy: 1,4 mm, 1,6 mm, 1,8 mm

Fig. 5. Screening efficiency 1,2-1,4 mm fraction for sieves with hole diameter: 1,4 mm, 1,6 mm, 1,8 mm

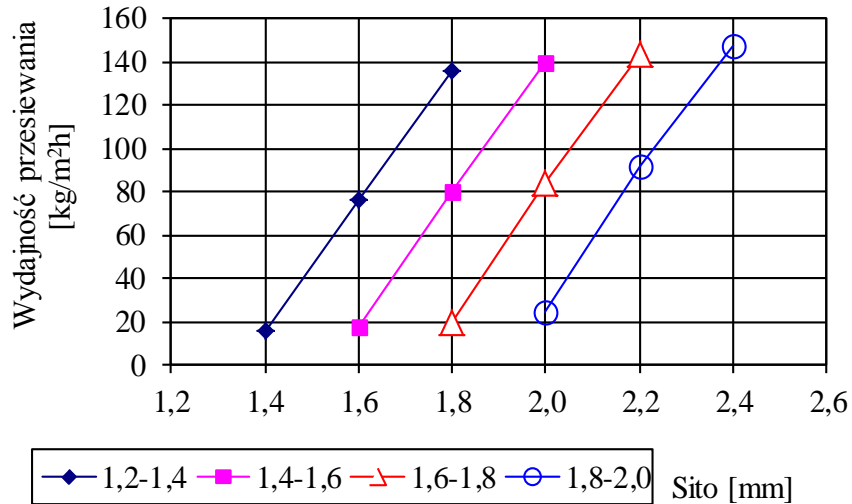
Wydajność ta jest większa od wydajności przesiewania materiału nierozdzielonego na frakcje. Analogicznie przebadano wydajność przesiewania dla kolejnych frakcji materiału ziarnistego przez sita o średnicach otworów równych górnemu wymiarowi frakcji (tab. 2).

Tabela 2. Wydajności przesiewania materiału ziarnistego przez kolejne 3 sita
Table 2. Screening efficiency of granular material through 3 consecutive sieves

			Wydajność przesiewania przez kolejne sita [kg·m ⁻² ·h ⁻¹]				
		nr sita	sito mm	frakcja 1,2-1,4	frakcja 1,4-1,6	frakcja 1,6-1,8	frakcja 1,8-2,0
		1	1,4	16			
	1	2	1,6	76	18		
	1	2	3	136	80	20	
1	2	3		2,0	140	84	24
2	3			2,2		144	92
3				2,4			148

Dla kolejnych sit, licząc od sita o najmniejszym oczku dla danej frakcji, wydajność przesiewania wzrasta. Najwolniej dana frakcja przechodzi przez sito najmniejsze, które w praktyce limituje wydajność przesiewania. Badając wydajność przesiewania przez najmniejsze sito zauważono, że jest zbliżona dla kolejnych pierwszych sit. Podobna zależność obowiązuje dla sita drugiego i trzeciego. Na tej podstawie wyliczono wartości średnie wydajności dla kolej-

nych sit. Uzyskane dane, dla kolejnych sit, dla kąta 45° przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wydajność przesiewania przez 3 sita w zależności od średnicy oczka sita
Fig. 6. Screening efficiency of granular material depending on the sieve mesh diameter through 3 consecutive sieves

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań wielopokładowego przesiewacza wibracyjnego pracującego w układzie zataczająco-śrubowym z dwoma wibratorami stwierdzono, że tłumienie zawieszenia sprężynowego dla 16 sprężyn wynosi dla osi X $\Psi_x = 0,93$, osi Y $\Psi_y = 0,99$ i osi Z $\Psi_z = 0,71$. Częstotliwość drgań własnych przy częstotliwości wymuszającej wibracje 25 Hz dla maksymalnej ilości 16 sprężyn, obliczona na podstawie wzoru (3) wynosi średnio ok. 9,4 Hz, a na podstawie pomiarów – wzór (4) – średnio ok. 11,4 Hz i jest zgodna z przewidywaniami.

Badania wskazują, że elementami o najmniejszej wydajności, limitującymi wydajność przesiewacza są: ruch materiału ziarnistego po sicie do wysypu oraz przesyp przez otwory sita, a optymalny kąt ustawienia wibratorów względem pionu dla uzyskania maksymalnej wydajności przesiewania zawiera się w granicach od 35° do 45° , a najlepiej 45° .

Wydajność przesiewania przez sito w badanym przesiewaczu limituje wydajność przesiewania maszyny i wynosi:

- dla sita pierwszego ok. $4 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ lub ok. $16 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$,
- dla sita drugiego ok. $19 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ lub ok. $76 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$,
- dla sita trzeciego ok. $34 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ lub ok. $136 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$.

Oszacowana (za pomocą znacznika) droga nasion na sicie o średnicy 0,6 m wynosi ok. 5 m, co sprzyja dokładnemu rozdzieleniu materiału ziarnistego na frakcje. Przeprowadzone pomiary pozwalają na dobór wydajności dozownika.

LITERATURA

- [1] BANASZEWSKI T.: Przesiewacze. Wydawnictwo Śląsk, 1990.
- [2] BANASZEWSKI T., FILIPOWICZ A.: Prędkość ziarna na pokładzie przesiewacza typu WK. Inżynieria mineralna, 2003, 15-25.
- [3] BLECHMAN I.: Synchronizacja dynamicznych systemów. Wydawnictwo Nauka Moskwa, 1971.
- [4] DOMORADZKI M., POĆWIARDOWSKI W., KANIEWSKA J.: Zastosowanie układu drgającego z dwoma zsynchronizowanymi wibratorami. Chemik 66(5), 2012, 5009-5014.
- [5] DIETRYCH J.: Teoria i budowa przesiewaczy. WGH Katowice, 1962.
- [6] ŁĄCZKOWSKI R.: Wibroakustyka maszyn i urządzeń. WNT Warszawa, 1983.
- [7] PISZCZEK K., WALCZAK J.: Drgania w budowie maszyn. PWN Warszawa, 1972.
- [8] SZTABA K.: Przesiewanie. Śląskie Wydawnictwo Techniczne Katowice, 1993.
- [9] WODZIŃSKI P.: Przesiewanie i przesiewacze. Monografie 907, Politechnika Łódzka, 1997.

MULTILAYER VIBRATING ROLLING-SCREW SCREEN

Summary: The study illustrates the principle of multilayer vibrating screen working in a rolling screw system with two vibrators working concurrently. Damping of vibrations transmitted to the base for a spring suspension composed of 8, 12 and 16 springs was measured. The highest levels of vibration isolation effectiveness for vertical vibration with ratio of 77.7% were achieved for combination of 16 springs. For variable angles to the vertical vibratory screening the highest screening efficiency was achieved when angles were between 35 and 45°. Efficiency of multilayer screen is limited by efficiency of screening through a first screen, which is 5 kg/h (26 kg/(h·m^{2D = 0.6 m was estimated at $L = 5$ m.}

Key words: vibrating screen, rolling-screw screen, screening

Andrzej SKIBICKI

NAPRĘŻENIA POZOSTAJĄCE PO SPAWANIU KRÓTKIMI ODCINKAMI, OBLICZANE Z ZASTOSOWANIEM MES

Streszczenie: Podczas spawania powstaje ciepło, które prowadzi do deformacji i naprężeń pozostających. Odpowiednio dobrana technologia spawania może zmniejszyć składowe naprężeń i odkształceń pozostających. Symulacja z wykorzystaniem metody elementów skończonych pozwala obliczyć ich wartości. Symulowano różne sposoby układania ściegu łączącego doczołowo aluminiowe blachy. Porównano efekty spawania ściegami: pojedynczym ciągłym, z podziałem na dwa ściegi o różnej kolejności i kierunku układania oraz z podziałem na trzy lub pięć ściegów układanych z krokiem wstecznym. Użyto własności materiałowych nieliniowo zależnych od temperatury.

Słowa kluczowe: spawanie, naprężenia, pozostające, MES, aluminium

1. WPROWADZENIE

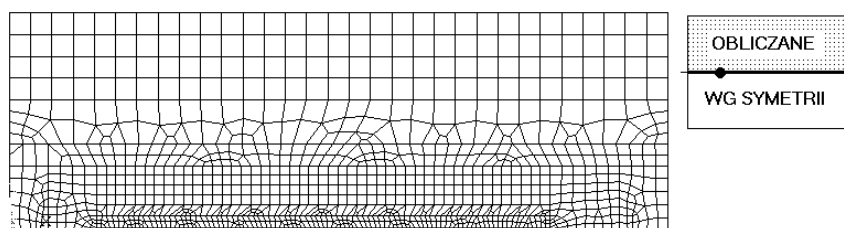
Ustawiczne dążenie do zmniejszenia masy konstrukcji kieruje uwagę konstruktorów w stronę metali lekkich i ich stopów. Spawanie stopów aluminium coraz częściej odbywa się z zastosowaniem nowoczesnych źródeł prądu, umożliwiających precyzyjne dostarczanie ciepła, np. dzięki zastosowaniu łuku okresowo przerywanego. Pozwala to na łatwiejsze wykonywanie spoin o wysokiej jakości bez znaczącego wzrostu kosztów. Jeżeli ważne jest zmniejszenie wartości pozostających po spawaniu naprężeń i odkształceń, to często stosuje się spawanie ze specjalnie zaplanowaną kolejnością wykonywania ściegów lub odcinków spoin. Możliwe i celowe jest zastąpienie pojedynczego długiego ściegu kilkoma innymi ściegami ułożonymi w zaplanowanej kolejności i kierunku. Interesującym wydaje się sprawdzenie, czy technologia ta nie ma ujemnych skutków, widocznych np. przy rozważaniu naprężeń pozostających.

Skutki mechaniczne wywołuje nierozłącznie związane ze spawaniem pole temperatury. Uwidaczniają się one poprzez odkształcenia lub pęknięcia spawanych elementów, będące wynikiem sumowania się pospawalniczych naprężeń pozostających z naprężeniami od obciążeń zewnętrznych. Próby przeciwdziałania temu zjawisku opierają się często na wyczuciu i doświadczeniu technologa planującego prace spawalnicze, tym bardziej, że niekiedy próbna seria nie może być brana pod uwagę. Badania eksperymentalne są kosztowne i skomplikowane. Zniechęcają do analizowania nietypowych, być może skutecznych, rozwiązań. Metody analityczne i analityczno-wykreślne mają ograniczony zakres sto-

sowania z powodu zmiennych nieliniowo (w funkcji temperatury T i innych czynników) własności materiałowych elementów spawanych. Pojawiają się też trudności przy modelowaniu złożonych cykli cieplnych. Stosując MES można na drodze obliczeniowej uzyskać wartości nieustalonych i pozostających pól naprężeń i odkształceń. Wyniki badań dla ściegów ciągłych przedstawiono w [1, 2, 6]. Spawanie stopów aluminium jest często utrudnione – tak ze względów metalurgicznych, jak i wynikających ze spawania pól temperatury, odkształceń i naprężeń. Wyraźnie inne własności niż dla stali, np. $\lambda(T)$, $\alpha_T(T)$, $R_c(T)$, zmieniają przebieg spawania i utrudniają zastosowanie znanych z praktyki – dla stali – sposobów. Wraz ze wzrostem wymiarów konstrukcji, powiększaniem się grubości i długości spoin problemy stają się coraz wyraźniejsze. Wcześniejsze poznanie rozkładów przejściowych i pozostających: temperatury, deformacji i naprężeń, umożliwić może opracowanie lepszych technologii (np. mniejsze nadatki, naprężenia, deformacje). Znając pole temperatury, można określić właściwą energię liniową, kolejność układania spoin i ściegów, wielkość jeziorka. Zastosowano do tego celu metodę elementu skończonego (MES). Na podstawie zgodności wyników własnych obliczeń i eksperymentu [6] prowadzonych dla trudno modelowalnego (ze względu na skokową zmianę wszystkich własności podczas przemiany $\alpha \rightarrow \gamma$ i wykazującej przechłodzenie przemiany $\gamma \rightarrow \alpha$) materiału typu stal, można sądzić że metoda nadaje się też dla innych materiałów, w tym także stopów aluminium.

2. MODEL NUMERYCZNY

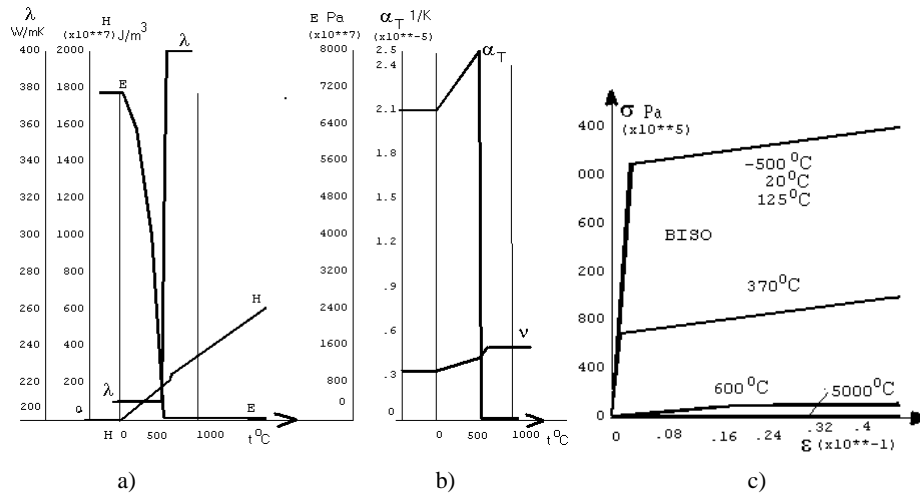
W trakcie obliczeń rozważano płytkę ze stopu PA20 o wymiarach $150 \times 100 \times 3,8$ mm, spawaną wzdłuż osi symetrii na odcinku 100 mm, z prędkością $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Symetria rozważanego zagadnienia pozwala na wykonywanie obliczeń dla $\frac{1}{2}$, odpowiednio utwierdzonej, płytki. Dwuwymiarowa sieć elementów, o zróżnicowanej zadanej grubości (3,8-5,0 mm), identyczna dla temperaturowej i strukturalnej części obliczeń, przedstawiono na rysunku 1. Sieć była generowana półautomatycznie, ale według ręcznie zadanej kolejności.



Rys. 1. Sieć elementów użyta w obliczeniach
Fig. 1. Finite element mesh used in calculation

Zastosowano 1337 elementów czworokątnych, czterowęzłowych: SHELL w części temperaturowej i PLANE w części strukturalnej. Użyto programu Ansys. Stosując MES, korzystano z zależności przedstawionych np. w [1, 2, 8].

Na górnej i dolnej powierzchni płytki uwzględniono konwekcję. Własności termiczne i mechaniczne materiału zależą od temperatury (rys. 2) [4, 5].



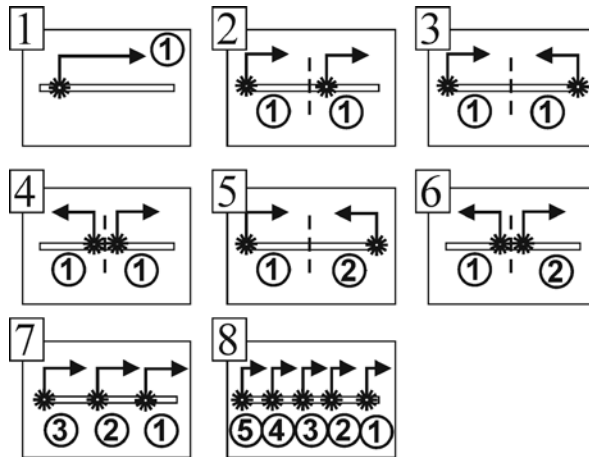
Rys. 2. Własności fizyczne stopu aluminium użyte w obliczeniach:

- a) współczynnik przewodzenia ciepła λ , entalpia H, moduł sprężystości E,
- b) współczynnik rozszerzalności temperaturowej α_T , współczynnik Poissona ν ,
- c) własności wytrzymałościowe R_e i E_T [4, 5]

Fig. 2. Properties for the aluminium alloy, as function of the temperature:

- a) thermal conductivity λ , enthalpy H, elastic module E, b) thermal dilatation α_T , Poisson ratio ν ,
- c) yield stress R_e , hardening module E_T [4, 5]

Zastosowano rozłożone, objętościowe źródło ciepła działające podobnie do spawalniczego łuku elektrycznego o mocy 2,6 kW, co odpowiada 4,0 kW przy $\eta = 65\%$. Symulowano 10,3 s spawania (z krokiem 0,1 s) i chłodzenie aż do 800 s procesu, uzyskując prawie równomierne 20°C w całym modelu. Zestawienie ośmiu analizowanych sposobów wykonywania ściegów i kolejność spawania przedstawiono na rysunku 3. Po zmianie rodzaju elementów na strukturalne model utwierdzono i obciążając go polem wcześniej obliczonej temperatury z odpowiedniej chwili czasu – prowadzono kolejne kroki obliczeń. Stosowano krok czasu 0,001 s, wzrastający stopniowo po 12. sekundzie symulowanego procesu. Analogicznie do utraty wytrzymałości i stabilności metali w miarę podwyższania temperatury model tracił stabilność numeryczną. Wymuszało to stosowanie małych kroków czasu (0,001 s) i wielu iteracji (ok. 16000). Przedłużało to obliczenia do ok. 10000 s pracy procesora. Uzyskane dla danej chwili czasu pole deformacji (przemieszczenia w płaszczyźnie XY) i naprężeń było punktem wyjścia dla kolejnego kroku czasu – aż do zakończenia założonego czasu spawania i chłodzenia. Wyniki można zapisać po każdym kroku czasu.

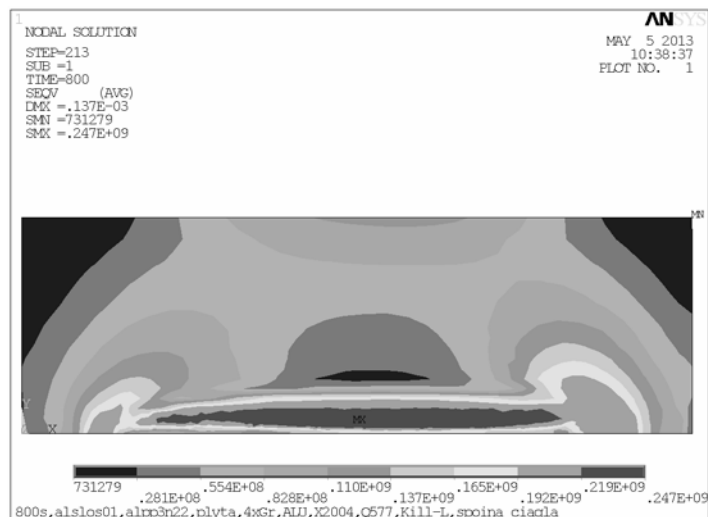


Rys. 3. Zestawienie sposobów wykonywania ściegów (1-8), kolejność spawania (①②③④⑤)

Fig. 3. Pictorial diagram of welds (1-8), welding sequence (①②③④⑤)

3. WYNIKI

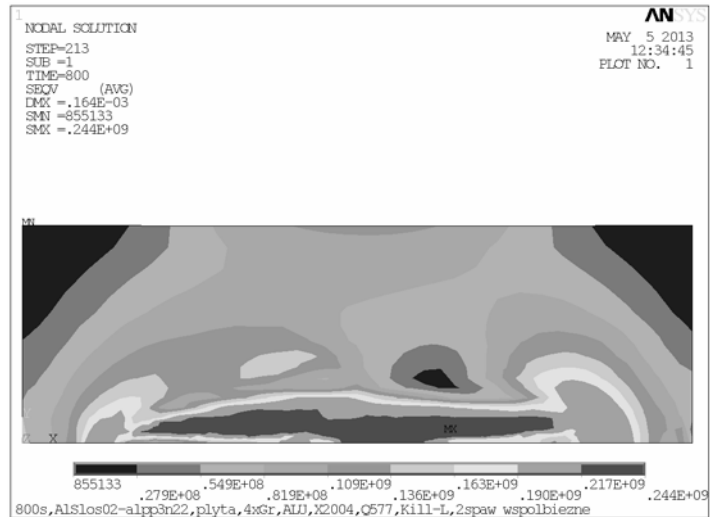
Przedstawiono cztery ważniejsze wykresy pozostających naprężeń zredukowanych (wg hipotezy Hubera-Misesa): na rysunku 4 po spawaniu 1 ściegiem ciągłym (cykl 1 na rys. 3), na rysunku 5 po spawaniu dwoma równoczesnymi, współbieżnymi ściegami (cykl 2), na rysunku 6 po spawaniu dwoma kolejnymi dosobnymi ściegami (cykl 5), oraz na rysunku 7 po spawaniu 5 krótkimi ściegami z krokiem odwrotnym (cykl 8). Przedstawiono izolinie na jednej z symetrycznych (względem osi spoiny) połówek modelu.



Rys. 4. Pozostające zredukowane naprężenia własne po spawaniu ściegiem ciągłym (rys. 3, p. 1)

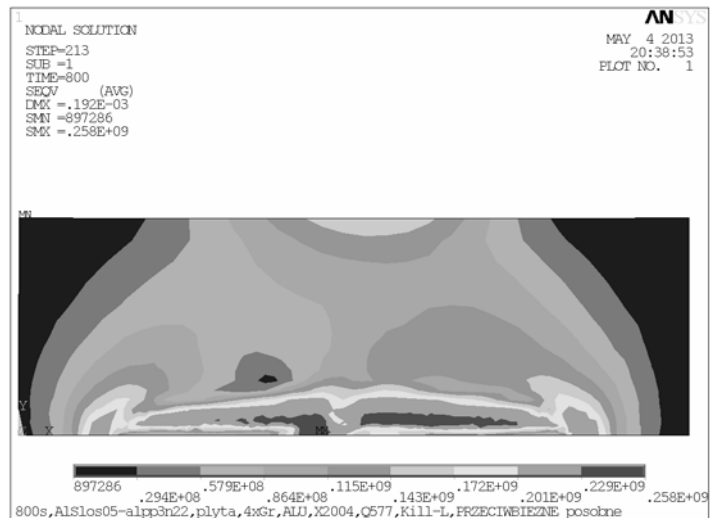
Fig. 4. Residual stresses (Huber-Misses), after one string bead (Fig. 3, p. 1)

Naprężenia pozostające po spawaniu...



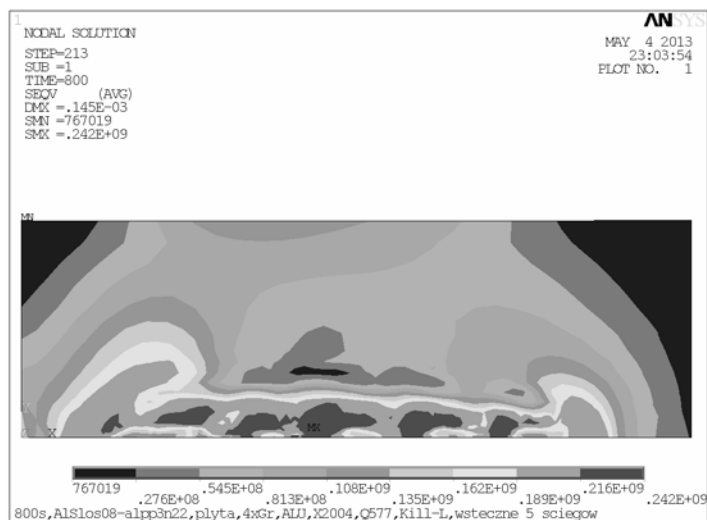
Rys. 5. Pozostające zredukowane naprężenia własne po równoczesnym spawaniu 2 współbieżnymi ściegami (rys. 3, p. 2)

Fig. 5. Residual stresses (Huber-Misses), after simultaneously welding with 2 isotropy beads (Fig. 3, p. 2)



Rys. 6. Pozostające zredukowane naprężenia własne po spawaniu 2 kolejnymi, dosobnymi ściegami (rys. 3, p. 5)

Fig. 6. Residual stresses (Huber-Misses), after simultaneously welding with 2, followings, centripetal beads (Fig. 3, p. 5)



Rys. 7. Pozostające zredukowane naprężenia własne po spawaniu 5 ściegami z krokiem odwrotnym (rys. 3, p. 8)

Fig. 7. Residual stresses (Huber-Mises), after simultaneously welding with 5, back-reversed-steps beads (Fig. 3, p. 8)

Obliczony rozkład temperatury wskazuje na uzyskanie pełnego przetopu w każdym z cykli. Głównym celem symulacji było uzyskanie naprężeń pozostających. W tabeli 1 zestawiono maksymalne naprężenia wzdłużne, poprzeczne i zredukowane. Przedstawiono również obliczone wartości deformacji (maksymalnego przemieszczenia węzłów na płaszczyźnie XY, uzyskano również kształt blachy po spawaniu). Obliczenia MES umożliwiają uzyskanie znacznie większej ilości i kategorii wyników, które mogą podlegać ukierunkowanej analizie.

Tabela 1. Wyliczone wartości naprężeń i odkształceń pozostających (maksymalne)
 Table 1. Calculated residual stresses and deformations (maximal)

Sposób spawania wg rysunku 3	Naprężenia pozostające [MPa]				zreduk. wg Hubera-Misesa	Deformacja [mm]
	wzdłużne, σ_x		poprzeczne, σ_y			
	max	min.	max	min.		
1	272	-117	160	-197	247	0,137
2	272	-119	154	-184	244	0,164
3	289	-144	115	-191	254	0,176
4	275	-96	160	-194	259	0,179
5	287	-169	159	-182	258	0,192
6	278	-93	180	-218	245	0,152
7	279	-142	160	-179	242	0,168
8	277	-126	183	-193	242	0,145

4. WNIOSKI I SPOSTRZEŻENIA

1. Spawanie 1 ściegiem (cykl 1/rys. 3) zazwyczaj prowadzi do niższych niż w pozostałych sposobach wartości pozostających naprężeń wzdłużnych i poprzecznych. Naprężenia zredukowane (Hubera-Misessa) nie są jednak najniższe z analizowanych sposobów. Deformacje pozostające są najniższe.
2. Wyniki wskazują, że spawanie 5 krótkimi odcinkami krokiem odwrotnym (cykl 8) prowadzi do najniższych wartości naprężeń zredukowanych. Obszary o najwyższych wartościach są niewielkimi, izolowanymi wyspami. Deformacje są nieznacznie większe niż dla cyklu 1.
3. Zmniejszenie liczby ściegów przypadających na badaną długość spoiny z 5 do 3 (cykl 7) prowadzi do zwiększenia wartości naprężeń i deformacji.
4. Spawanie dwoma ściegami w zależności od sposobu jego przeprowadzenia może istotnie, również niekorzystnie, zmienić pozostające naprężenia i deformacje. Dla sposobu (6) uzyskano obniżenie zredukowanych naprężeń pozostających przy nieznacznie większych deformacjach. Dla sposobu (5) otrzymano bardzo wysokie wartości naprężeń zredukowanych, wzdłużnych i poprzecznych oraz największe deformacje.
5. Wyniki obliczeń wskazują, że spawanie krótkimi ściegami z krokiem odwrotnym może prowadzić do ograniczenia pozostających po spawaniu naprężeń i odkształceń, pod warunkiem jednak poprawnego dobrania długości, kierunku i kolejności ich układania.
6. Różnica wartości naprężeń maksymalnych, chociaż nie przekracza 10% i przy obciążeniu statycznym może mieć znaczenie drugorzędne, to jednak dla obciążeń zmęczeniowych lub dla materiałów o podwyższonej skłonności do pęknięcia może być istotna.
7. Małe obszary koncentracji naprężeń mogą pozostać niezauważone podczas badań eksperymentalnych – MES jest więc ważnym narzędziem badawczym umożliwiającym pełniejsze poznanie wpływu sposobu i kolejności układania ściegów na stan naprężeń pospawalniczych.

LITERATURA

- [1] ARGYRIS J.H., SZIMMAT J., WILLAM K.J.: Finite Element Analysis of Arc-welding Process. Numerical Methods in Heat Transfer, 1985, vol. III.
- [2] GOLDAK J. i in.: Computer Modeling of Heat Flow in Welds. Metallurgical Transactions B. 1986, 9, 587-600.
- [3] JAKUBIEC M., LESIŃSKI K., CZAJKOWSKI H.: Technologia konstrukcji spawanych. WNT Warszawa, 1987.
- [4] RADAJ D.: Heat effects of welding. Springer Verlag Berlin, 1992.
- [5] RANATOWSKI E.: Elementy fizyki spajania metali. Wyd. ATR Bydgoszcz, 1999.
- [6] SKIBICKI A.: Identyfikacja stanu termicznych i mechanicznych skutków procesu spawania wybranych elementów z uwzględnieniem metod numerycznych. Praca doktorska, ATR Bydgoszcz, Wydział Mechaniczny, 1998.
- [7] ŚLEDZIEWSKI E.: Konstrukcje spawane. WSiP Warszawa, 1974.
- [8] ZIENKIEWICZ O.C.: Metoda Elementów Skończonych. Arkady Warszawa, 1972.

RESIDUAL STRESSES AFTER SHORT-STEPS WELDING, CALCULATED WITH FEM

Summary: Heat, necessary for welding, cause to deformation and stresses. Right technology can decrease this deformation and stresses. With FEM simulation is possible to calculate his value. At the paper was shown simulation of butt welding of aluminum. Here were compared effects of different beads: one string, divided to 2,3, or 5 steps with centripetal, isotropy and back-reversed-steps, with combined welding sequences. Temperature-dependent material properties were used.

Key words: welding, FEM, aluminum, stress, residual

Ali Osman SUIÇMEZ, Michał PIOTROWSKI, Maciej KOTYK

TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA A RODZAJ POŁĄCZENIA SPAWANEGO STALI S650MC I S700MC

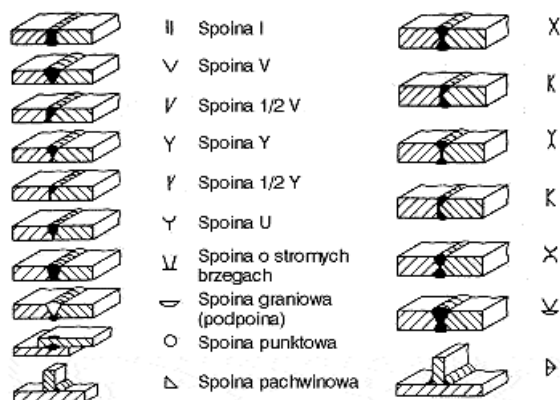
Streszczenie: W pracy zaprezentowano wyniki badań zmęczeniowych i statycznych próbek wykonanych z dwóch gatunków stali. Próbki były wykonane ze spajanych ze sobą kawałków blach w sposób trwały za pomocą spawania łukiem krytym. Badania miały na celu zobrazowanie wytrzymałości mechanicznej poszczególnych rodzajów spoin.

Słowa kluczowe: wytrzymałość zmęczeniowa, wytrzymałość statyczna, spoina, spawanie stali

1. WPROWADZENIE

Spośród technologii łączenia materiałów w sposób nierozłączny najbardziej rozpowszechnione jest spawanie. Zdecydowana większość przemysłu mechanicznego wykorzystuje tę technikę spajania do budowy nowych konstrukcji, jak i regeneracji uszkodzonych obiektów.

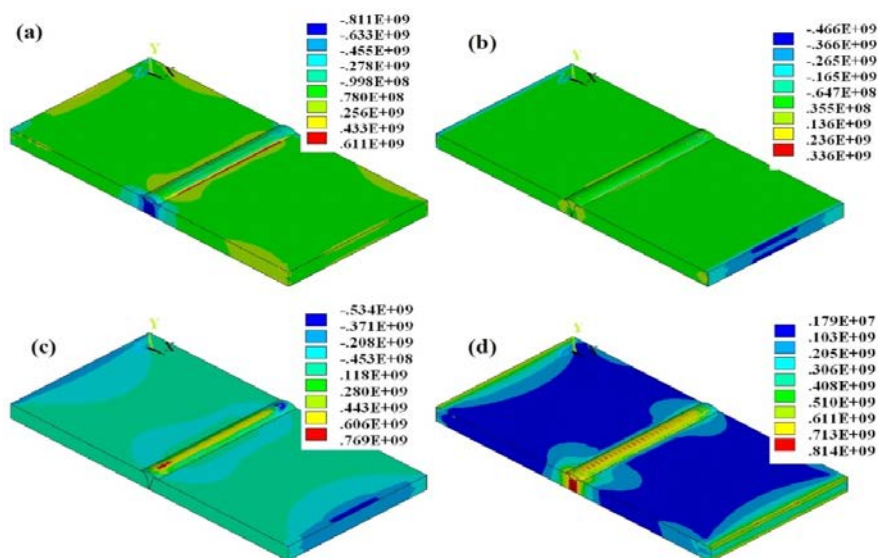
Na przestrzeni ubiegłego stulecia powstało wiele różnych metod spawania zróżnicowanych ze względu na źródło energii cieplnej i sposób tworzenia atmosfery ochronnej itp. Rozróżnia się kilka podstawowych rodzajów spoin (rys. 1).



Rys. 1. Rodzaje złączy spawanych
Fig. 1. Types of welded joints

mgr inż. Ali Osman SUIÇMEZ, Sakarya Üniversitesi, e-mail: aliosmansuicmez@hotmail.com
mgr inż. Michał PIOTROWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: m.piotrowski@utp.edu.pl
mgr inż. Maciej KOTYK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Odmienne techniki spawania i rodzaj złączy dają szereg zróżnicowanych zalet w postaci: możliwości spajania odmiennych materiałów, łatwej automatyzacji procesu, możliwości spawania w niekorzystnych warunkach (np. spawanie podwodne), szczelności złącza, jak i wiele innych [2]. Jednakże proces spawania ma także szereg wad, niejednokrotnie uniemożliwiających wykorzystanie tej techniki spajania [6], np. zmiana struktury materiału w strefie wpływu ciepła oraz odkształcenia cieplne powstające na skutek miejscowego dostarczenia dużej ilości skondensowanej energii cieplnej. Przebudowa struktury materiału w sposób oczywisty ma wpływ na wytrzymałość doraźną, jak i zmęczeniową, odkształcenia pospawalnicze wywołują dużą ilość naprężeń skupionych w samej spoinie, w strefie wpływu ciepła, ale i w szczególnych przypadkach w całej konstrukcji. Stosując różne techniki spawania można zmniejszać wielkość powstałych naprężeń, jednak nigdy nie uniknie się ich występowania. Należy pamiętać o tym, iż spiętrzenia naprężeń w spoinie nie są jedynie wynikiem powstania karbu technologicznego w samej spoinie i strefie wpływu ciepła, ale także wynikiem oddziaływania odkształceń cieplnych i skurczów pospawalniczych [1]. Rozkład naprężeń składowych i ekwiwalentnych przedstawiono na rysunku 2. Ważne jest odpowiednie konstruowanie przebiegu i charakteru spoin [3]. Zakres podjętych badań obejmował badania czterech typów próbek w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych.



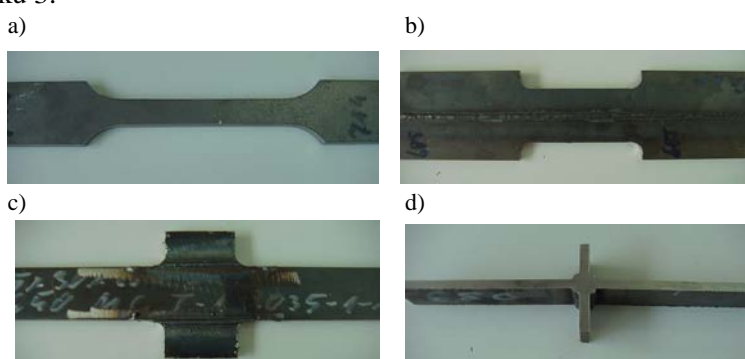
Rys. 2. Spiętrzenie naprężeń w spoinie doczołowej V: a) naprężenie normalne w poprzek grubości SX, b) naprężenia normalne wzdłuż grubości SY, c) SZ naprężenia wzdłużne, d) naprężenie resztkowe [2]

Fig. 2. a) transverse stress SX, b) along-thickness normal stress SY, c) longitudinal stress SZ, d) von Mises equivalent residual stress SEQV mapping of weld by hybrid laser-GMA welding (unit of stress in the contour is Pa) [2]

W spoinach występuje spiętrzenie naprężeń wynikające z:

- karbu mechanicznego (lokalna zmiana kształtu przedmiotu),
- karbu strukturalnego (lokalna zmiana struktury materiału),
- wad spawalniczych,
- dodatkowych naprężeń spawalniczych.

Eksperyment przeprowadzono zgodnie z normami PN-EN ISO 68921:2009 Próba statycznego rozciągania w temperaturze otoczenia oraz PN-74/H-04327 Badanie metali na zmęczenie. Do badań wykorzystano 4 typy próbek wykonane ze stali S650MC (6) oraz stali S700MC (7). Kształt próbek przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Obiekty badań: a) próbka gładka (typ A), b) ze spoiną wzdłużną (typ B), c) ze spoinami wzdłużnymi (typ C), d) połączenie krzyżowe (typ D)

Fig. 3. Objects of research: a) smooth specimen (type A), b) the longitudinal weld (type B), c) the longitudinal welds (type C), d) the cross (type D)

2. BADANIA STATYCZNE

Próby statycznego rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 8501, wyposażonej w głowicę siłową w zakresie pomiarowym ± 100 kN. Pomiaru wydłużenia dokonywano, wykorzystując ekstensometr do prób statycznych o bazie pomiarowej 50 mm, mocowany na części pomiarowej próbki. Badania polegały na poddawaniu próbki obciążeniu narastającemu z prędkością przesuwu tłoka maszyny wynoszącą $0,05 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ [5].

Badania przeprowadzono w temperaturze 21°C i wilgotności 30%. Próby prowadzono do chwili rozdzielenia próbki w obszarze części pomiarowej. W trakcie próby rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej próbkę oraz jej wydłużenie.

3. BADANIA ZMĘCZENIOWE

Badane próbki poddano zmiennemu, odzerowo tętniącemu rozciąganiu (tab. 1) [4]. Poziomy obciążenia przyjęte do badań określono po analizie wyników prób statycznego rozciągania. Parametry obciążenia zmiennego zestawiono

w tabeli 1. Próby zmęczeniowe prowadzono do chwili wystąpienia pęknięcia próbki. W trakcie badań poziomy naprężenia dla próbek typu D zostały zmienne ze względu na nieprzewidziane wcześniej wartości uzyskanych wyników i dla naprężenia 90 MPa uzyskany wynik wchodził w zakres niskocyklowy.

Tabela 1. Parametry obciążenia zmiennego stosowane podczas badań
Table 1. Parameters of variable stress

Poziom	Naprężenie [MPa]			
	σ_{max}	σ_{min}	σ_a	$\Delta\sigma_a$
1	70	0	35	70
2	80	0	40	80
2	90	0	45	90

4. WYNIKI BADAŃ PRÓB STATYCZNYCH I CYKLICZNYCH

Forma uszkodzenia próbek podczas prób statycznego rozciągania była związana z typem próbki. W przypadku próbki bez spoin (typ A) oraz próbki ze spoiną wzdłużną (typ B) pęknięcie następowało zawsze w części pomiarowej próbki (rys. 4a, b). Powyższe dotyczyło obydwu gatunków stali. W przypadku pozostałych dwóch rodzajów próbek pęknięcie następowało zawsze w pobliżu spoiny. Wyjątkiem jest połączenie krzyżowe, gdzie połączenie spawane zawsze uległo rozerwaniu w strefie spoiny. Pęknięcia próbek typu C i D przedstawiono na rysunku 4c i 4d.

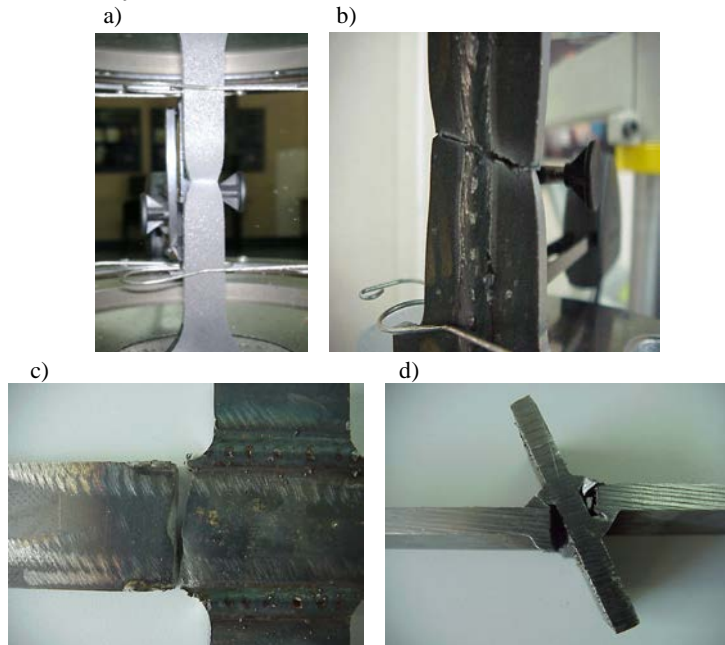
Wyniki prób statycznego rozciągania przedstawiono w formie tabelarycznej. Naprężenie w próbce obliczano, dzieląc wartość chwilową siły obciążającej przez przekrój początkowy próbki. Jako przekrój początkowy przyjmowano: dla próbek typu A – przekrój określony wymiarami poprzecznymi próbki, dla próbek typu B, C, D – przekrój określony wymiarami poprzecznymi próbki poza spoiną.

Wyniki badań z maszyny wytrzymałościowej poddano szczegółowemu opracowaniu. Wyniki opracowania zestawiono w tabeli 2.

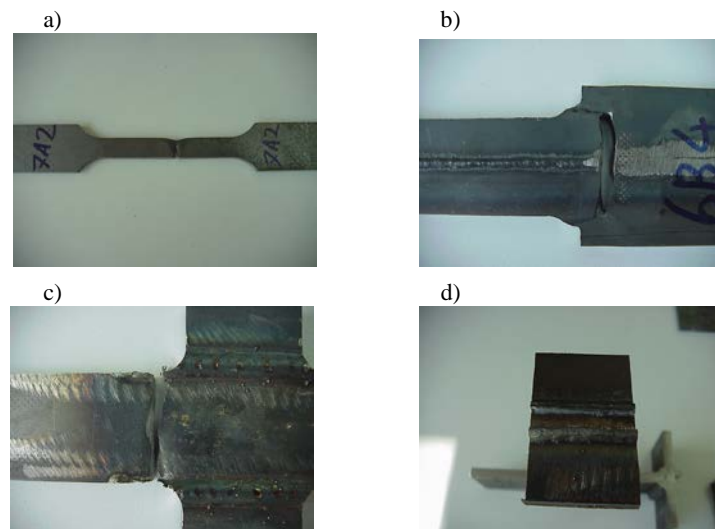
Tabela 2. Wyniki opracowania wykresów statycznego rozciągania
Table 2. Tensile test results

Lp.	Typ próbki	Stal S650MC			Stal S700MC			Normatywnie	
		Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]	Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]	S650MC	S700MC
1	A	815	754	22,66	814	779	21,51	Rm _{max} = 880 Re = 650 A = 20	Rm _{max} = 950 Re = 700 A = 20
2	B	850	766	21,12	797	695	20,68		
			Rp _{0,2}			Rp _{0,2}			
3	C	855	594	8,02	872	664	6,67		
4	D	691	668	1,25	744	689	1,3		

Na rysunku 5 pokazano najczęściej spotykane postaci uszkodzenia podczas prób zmęczeniowych.

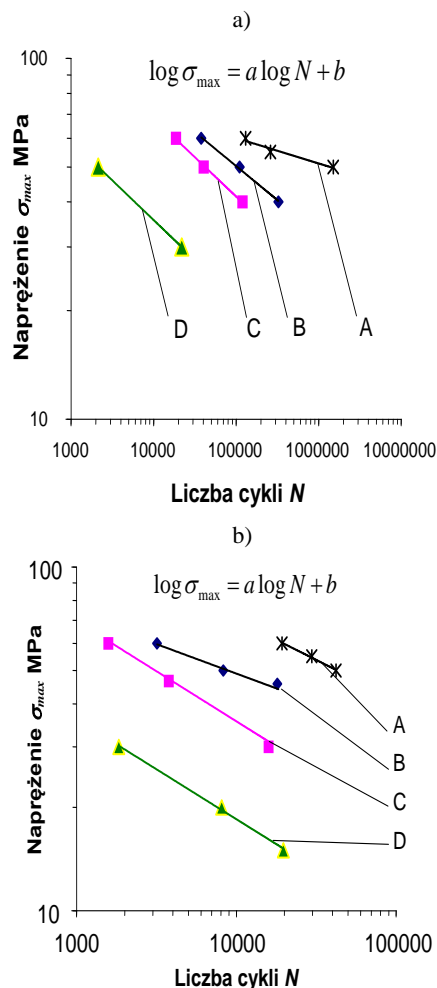


Rys. 4. Forma uszkodzenia próbek podczas prób statycznych: a) uszkodzenie próbki typu A, b) uszkodzenie próbki typu B, c) uszkodzenie próbki typu C, d) uszkodzenie próbki typu D
Fig. 4. The static tests damaged form of samples: a) the damage to the sample type A, b) damage to the sample type B, c) damage to the sample type C, d) damage to the sample type D



Rys. 5. Postaci uszkodzenia podczas prób zmęczeniowych: a) typ A, b) typ B, c) typ C, d) typ D
Fig. 5. The fatigue tests damaged form of samples: a) the damage to the sample A, b) damage to the sample B, c) damage to the sample type C, d) damage to the sample type D

Uzyskane podczas badań zmęczeniowych trwałości przedstawiono na rysunkach 6 i 7 w postaci wykresów zmęczeniowych w układzie współrzędnych liczba cykli do pęknięcia N – naprężenie σ_{max} .



Rys. 6. Wykresy zmęczeniowe: a) stal S650MC, b) stal S700MC
 Fig. 6. Fatigue life graphs: a) steel S650MC, b) steel S700MC

Wykresy zmęczeniowe w układzie bilogarytmicznym aproksymowano równaniem w postaci:

$$\log \sigma_{max} = a \log N + b \quad (1)$$

gdzie:

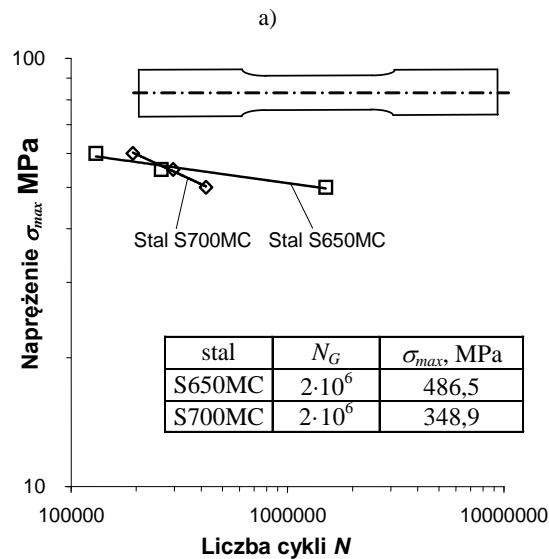
- a – współczynnik kierunkowy wykresu,
- b – wyraz wolny prostej regresji wykresu.

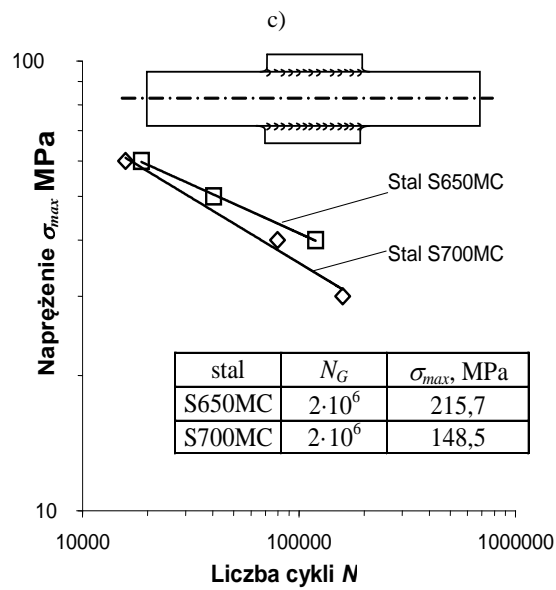
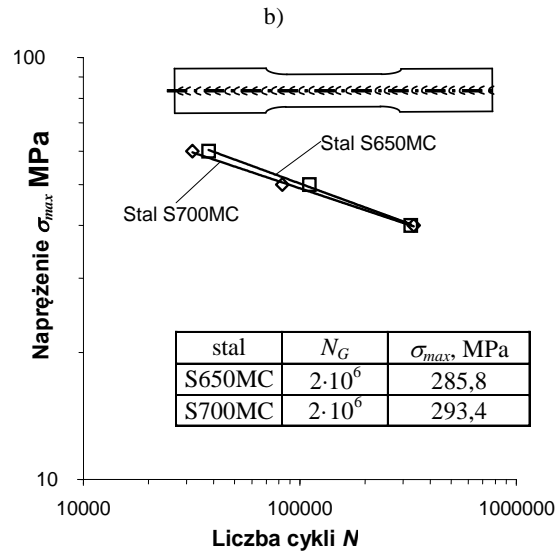
Na podstawie wyników badań obliczono z równania wykresu zmęczeniowej wartości naprężeń odpowiadające bazowym liczbom cykli $N_G = 10^6$, $N_G = 2 \cdot 10^6$. Uzyskane wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3 i na rysunku 7.

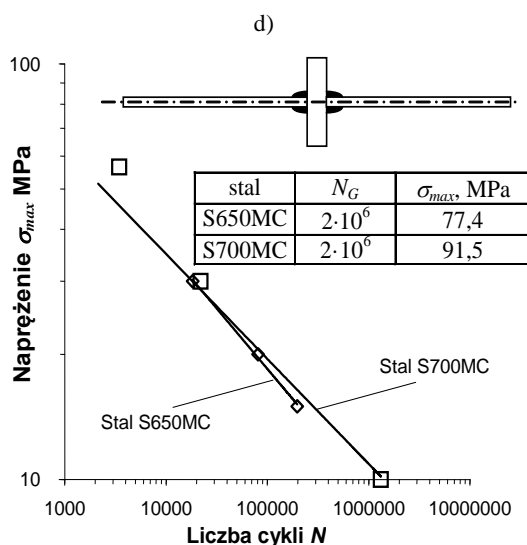
Tabela 3. Parametry wykresów zmęczeniowych dla próbek wykonanych ze stali S650MC i S700MC
Table 3. Fatigue life function parameters of steel S650MC and S700MC

Typ próbki	Stal	Równanie	a	b	σ_{max} dla $N_G=2 \cdot 10^6$
A	S650MC	$\sigma_{max}=a \cdot \log N + b$	-0,0706	1355	486,5042
	S700MC		-0,2333	10300	348,9851
B	S650MC		-0,1885	4403,9	285,8204
	S700MC		-0,1712	3518	293,4672
C	S650MC		-0,2177	5079	215,7963
	S700MC		-0,2914	10189	148,5975
D	S650MC		-0,2903	5226,6	77,45158
	S700MC		-0,2526	3576,2	91,57599

W celu porównania uzyskanych wyników trwałości próbek tego samego typu wykonanych ze stali S650MC i S700MC na rysunku 7 zestawiono wykresy zmęczeniowe.







Rys. 7. Wykresy zmęczeniowe uzyskane dla różnych typów próbek: a) próbka gładka (typ A), b) ze spoiną wzdłużną (typ B), c) ze spoinami wzdłużnymi (typ C), d) połączenie krzyżowe (typ D)

Fig. 7. Fatigue life graphs: a) smooth specimen (type A), b) the longitudinal weld (type B), c) the longitudinal welds (type C), d) the cross (type D)

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż wytrzymałość jest ściśle zależna od rodzaju spoiny, jak i sposobu jej obciążenia. Trwałość zmęczeniowa próbek układu się w ciąg zależny od rodzaju próbki ze spoiną (w kolejności D, C, B, A), który nie zmienia swej kolejności dla różnych materiałów. Jest to zależne od kształtu spoiny na poszczególnych rodzajach próbek, co bezpośrednio przekłada się na sposób obciążenia samej spoiny. Obliczona granica zmęczenia na poziomie $2 \cdot 10^6$ cyklu dla próbek typu A i C ma większy poziom naprężeń dla stali S650MC, co zmienia się na korzyść stali S700MC dla próbek typu B i D. Występowanie spoin czołowych na przebadanych próbkach zwiększa wytrzymałość doraźną, a zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową w stosunku do materiałów rodzimego.

Uzyskane wyniki badań blach spajanych dwoma rodzajami najczęściej stosowanych spoin spawalniczych pokazały, że rodzaj spoiny ma znaczny wpływ na wytrzymałość doraźną i zmęczeniową uzyskanych połączeń:

- czołowe – wysoka wytrzymałość na obciążenia stałe i zmienne,
- pachwinowe – łatwe w wykonaniu, niższa wytrzymałość szczególnie w przypadku obciążeń zmiennych.

Rodzaj spoiny i jej umiejscowienie ze względów wytrzymałościowych należy uwzględnić przy konstruowaniu obiektów spawanych.

LITERATURA

- [1] KONG F., KOVACEVIC R., Development of a Comprehensive Process Model for Hybrid Laser-Arc Welding. Southern Methodist University, 2011.
- [2] MAZANEK K., ŚNIEŻEK L., ŚLEŻAK T., Badania zmęczeniowe połączeń spawanych wysokowytrzymałej stali S960QL. Biuletyn WAT 62(1), 2013.
- [3] MUCHRYJ J., STACHURSKI M., Badania złączy spawanych. Biuro Gamma Warszawa, 2003.
- [4] PN-74/H04327- Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.
- [5] PN-EN 10002-1:2004. Metale. Próba rozciągania. Metoda badania w temperaturze otoczenia.
- [6] http://engineeringtraining.tpub.com/14070/css/14070_37.htm

FATIGUE LIFE AND TYPE OF STEEL WELDED JOINT, STEEL S650MC AND S700MC

Summary: The paper presents a summary of the results of fatigue life tests and static samples made of two types of steel. The samples were made from bonded together pieces of steel. The tests were designed to illustrate the various types of mechanical strength of the joints.

Key words: strength of materials, welded joints, fatigue life

Maciej TEMPLIN

ELEKTROWNIA RZECZNA O MAŁYCH NAKŁADACH

Streszczenie: W pracy skoncentrowano się na małych elektrowniach wodnych, ze względu na ich niewykorzystywany potencjał w Polsce. Przeważający niski charakter ukształtowania terenu nie sprzyja budowaniu elektrowni na rzekach, mimo to występują niewykorzystywane na potrzeby energetyki odcinki rzek, na których można zainstalować tzw. małe elektrownie wodne. Po to, aby zlokalizować optymalne miejsce pod budowę elektrowni, należy nie tylko brać pod uwagę aspekty ekonomiczne, ale również ekologiczne i społeczne. Praca poświęcona jest tematyce racjonalnego wyszukiwania lokalizacji pod ich budowę z wykorzystaniem systemów informacji geograficznej. Cel osiągnięto głównie poprzez przedstawienie kosztów inwestycyjnych (cena budowy MEW).

Słowa kluczowe: nakłady inwestycyjne, względy techniczne oraz aspekty prawno-ekonomiczne rozwoju hydroenergetyki, bilans ekonomiczny budowy i eksploatacji elektrowni wodnej, wybór elektrowni rzecznych o małych nakładach

1. WPROWADZENIE

W ciągu ostatnich lat prowadzone są intensywne dyskusje na temat konieczności inwestycji w odnawialne źródła energii (OZE). Nie ulega wątpliwości fakt, że w Polsce musimy zwiększyć udział produkcji energii elektrycznej z alternatywnych źródeł energii w ogólnej jej produkcji. W Polsce do najbardziej popularnych ze względu na uwarunkowania środowiskowe i niskie nakłady finansowe należą elektrownie wiatrowe [1]. Mniej rozwijanym sposobem pozyskiwania prądu, który zyskuje powoli na znaczeniu, są elektrownie wodne, które choć wymagają większego kapitału początkowego, mogą produkować energię przez dziesiątki lat, a w konsekwencji zwrócić poniesione koszty w dłuższym czasie (jego długość zależy od wielu czynników, jednak mała elektrownia wodna o mocy 1 MW generuje roczny przychód rzędu kilku milionów złotych przy poniesionych nakładach od kilkunastu milionów wzwyż) [10]. Małe elektrownie wodne (MEW) generują moc wg polskiego prawa do 5 MW.

W celu zlokalizowania nowego miejsca pod budowę elektrowni wodnej należy uwzględnić czynniki przyrodnicze, społeczne, ekonomiczne oraz uwarunkowania prawne. Jako optymalną lokalizację MEW uznaje się inwestycję zgodną z prawem lokalnym, powodującą minimalne negatywne skutki ekologiczne, maksymalne korzyści społeczne oraz jak największą opłacalność ekonomiczną [4].

Prawne uwarunkowania należy zweryfikować indywidualnie w przypadku każdej lokalizacji poprzez analizę miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego, planu gospodarowania wodami w dorzeczu oraz konsultację w Regionalnym Zarządzie Gospodarki Wodnej w celu uzyskania informacji na temat przepływu nienaruszalnego danej rzeki. Wykorzystanie wody na cele hydroenergetyki uznaje się wg Prawa Wodnego za szczególny sposób korzystania z wód i jako takie wymaga od inwestora uzyskania pozwolenia wodnoprawnego [2].

Ograniczanie wpływu elektrowni wodnej na środowisko następuje poprzez inwestycję w ekologiczną technologię (np. przepławki) oraz wybór miejsca, w którym, po postawieniu zapory, powstanie zbiornik retencyjny o jak najmniejszej powierzchni i jak największej objętości. Ze względu na duże zmiany ekosystemu nie jest możliwe uzyskanie zezwolenia na budowę piętrzenia w obrębie parków narodowych oraz rezerwatów przyrody. Dozwolone jest natomiast, budowanie ich na terenie obszarów NATURA 2000 [8], ale tylko w sytuacjach uzasadnionych ochroną przyrody lub z udokumentowanym brakiem negatywnego oddziaływania na gatunki i siedliska flory i fauny, z powodu których został utworzony ten obszar [7].

Moc elektrowni jest w dużej mierze zależna od zastosowanej technologii, jednak roczna produkcja energii elektrycznej zależy przede wszystkim od czynników środowiskowych: różnicy poziomów wody powyżej i poniżej piętrzenia oraz średniego rocznego przepływu wody, a te można z powodzeniem analizować, wykorzystując systemy informacji geograficznej.

W pracy przedstawiono metody wstępnego wyszukiwania obszarów możliwych do wykorzystania na cele hydroenergetyki oraz ich oceny pod względem ekologicznym i ekonomicznym za pomocą metod analizy geoinformacyjnej.

2. POTENCJAŁ ENERGETYCZNY RZEKI

Rzeczywiste możliwości wykorzystania zasobów energetycznych są niewielkie. Związane jest to z wieloma ograniczeniami i stratami, z których najważniejsze to:

- nierównomierność naturalnych przepływów w czasie,
- naturalna zmienność spadów, w tym zmienność spadów wynikająca z gospodarki wodnej w zbiornikach,
- sprawność urządzeń,
- istniejące warunki terenowe (zabudowa),
- bezzwrotny pobór wody dla celów nie-energetycznych,
- konieczność zapewnienia minimalnego przepływu wody w korycie rzeki poza elektrownią.

Podane wyżej ograniczenia i straty powodują zmniejszenie potencjału teoretycznego, uzyskany zaś wynik określany jest jako potencjał techniczny.

Potencjał techniczny (netto) jest pomniejszony w stosunku do potencjału brutto o współczynnik uwzględniający stopień wykorzystania spadku i przepływu wody oraz sprawność stosowanych urządzeń (turbozespołu). Jest to potencjał, który można pozyskać w wyniku realizacji wszystkich budowli piętrzących i elektrowni możliwych do wykonania ze względów technicznych, biorąc pod uwagę potrzeby innych użytkowników (pobory wody dla innych celów).

Zasoby tzw. małej energetyki szacowane są wg różnych materiałów źródłowych na 1700 GWh/a, w tym około 500 GWh/a stanowią zasoby tzw. mikroenergetyki, w obiektach o mocy instalowanej mniejszej od 100 kW. W związku z tym łączne zasoby wodno-energetyczne kraju wynoszą (dane z 2012 roku wg Towarzystwa Rozwoju Małych Elektrowni Wodnych sp. z o.o.):

$$11\ 950 + 1\ 700 = 13\ 650\ \text{GWh/a} \quad (1)$$

Niemniej jednak, uwzględniając aktualne warunki budowy elektrowni wodnych ograniczające ich realizację ze względów ekonomicznych i ochrony przyrody, praktycznie zasoby należy oszacować maksymalnie na około 8 000 GWh/a.

Charakterystyczne dla elektrowni wodnych są znikome koszty eksploatacji (wynoszące średnio około 0,5÷1% łącznych nakładów inwestycyjnych rocznie) oraz wysoka sprawność energetyczna (90÷95%).

Polska leży na terenach o niewielkich zasobach wodnych, których wykorzystanie dla celów energetycznych jest poważnie ograniczone (w niektórych krajach – np. w Norwegii – elektrownie wodne pokrywają zapotrzebowanie na energię elektryczną prawie w 100%). Ze względu na deficyty wody (szczególnie w okresie niskich stanów) przy istniejącej i planowanej zabudowie rzek, priorytet mają zagadnienia gospodarki wodnej.

Zaniechano budowy wielu piętrzeń i zbiorników retencyjnych, planowanych w latach 1970-1980, związanych z zaopatrzeniem przemysłu, rolnictwa, ludności w wodę, które można by wykorzystać energetycznie; nieliczne obiekty piętrzące budowane są głównie dla ochrony przed powodzią. Założono, że energia wody płynącej jest równa energii kinetycznej [9].

$$E = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

Wyrażenie na moc hydrauliczną płynącej wody wynosi:

$$P_h = \frac{\rho \cdot A \cdot v^2}{2} \text{ [W]} \quad (3)$$

gdzie:

- A – natężenie przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- v – prędkość przepływu wody [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],
- ρ – gęstość wody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
- m – masa [kg].

Obliczona z ostatniego wzoru moc jest tylko teoretyczna [3], praktycznie dostępna moc wynika ze stopnia utraty prędkości wody przed oraz za turbiną i wartość jej jest znacznie mniejsza. Zasoby energii płynącej wody są duże, jednak energia ta jest rozproszona i nie jest możliwe uzyskiwanie znacznych ilości energii z pojedynczych urządzeń, bowiem – jak wynika ze wzoru na moc hydrauliczną płynącej wody – zależy ona od powierzchni obszaru, przez który przepływa woda, a wielkość ta jest ograniczona względami technicznymi, głębokością rzeki itp. Ponadto zależy ona od trzeciej potęgi prędkości płynącej wody, a prędkość ta nie jest zbyt duża i wynosi zwykle $(1-2) \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

W korycie rzeczonym woda porusza się dzięki sile grawitacji. Prędkość, z jaką płynie rzeka, zależy od następujących czynników:

- spadku podłużnego rzeki,
- kształtu przekroju poprzecznego koryta rzeki,
- ukształtowania dna i brzegów.

W obrębie koryta rzeczego są miejsca, w których woda płynie szybciej i takie, w których woda płynie wolniej. Przy brzegach i dnie tarcie powoduje, że prędkość wody jest mniejsza. Największa prędkość wody jest w nurcie rzeki. Rzeki charakteryzują się ponadto dużą zmianą prędkości wody w czasie w zależności od zmian zasilania rzeki w wodę. Zatem prędkości wody będą inne w różnych porach roku. Podstawową zaletą małych turbin hydroenergetycznych, urządzeń wykorzystujących przepływ wody jest minimalna ingerencja w środowisko – nie jest konieczne budowanie kosztownych zapór oraz stosunkowo niewielkie nakłady finansowe.

3. SKŁADNIKI BILANSU EKONOMICZNEGO BUDOWY I KSPLOATACJI ELEKTROWNI WODNEJ

Elektrownie wodne charakteryzują się specyficznymi cechami techniczno-ekonomicznymi mającymi istotny wpływ na uzasadnienie celowości realizacji tych inwestycji. Do podstawowych należą (tab. 1):

- stosunkowo wysokie nakłady inwestycyjne,
- niskie koszty eksploatacyjne,
- brak kosztów zmiennych – paliwa,
- długi okres użytkowania.

Wysokie nakłady inwestycyjne powodują, że w okresie spłaty kredytu występują wysokie koszty kapitałowe. W takim przypadku z pewnością sytuację poprawiają preferencyjne, niskoprocentowane kredyty NFOŚiGW (Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej) i WFOŚiGW (Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej).

W przypadku budowy nowych stopni wodnych, w których jednym z elementów piętrzących jest elektrownia, koszt robót budowlanych (w tym budowli piętrzących) stanowi 40 do 80% kosztów całkowitych. Budowla piętrząca

Elektrownia rzeczna o małych nakładach

jest bardzo kosztownym elementem stopnia, dlatego inwestorzy starają się raczej wykorzystać istniejące budowle hydrotechniczne.

Tabela 1. Przykładowa procentowa struktura nakładów na elektrownię małej mocy
Table 1. Sample rate structure of expenditures for small power plants

Lp.	Wyszczególnienie	Udział [%]
1	Nakłady bezpośrednie:	
a)	roboty budowlano-montażowe (GRI):	58,5
	– urządzenia elektryczne	5,1
	– urządzenia mechaniczne	5,4
	– budowlano-hydrotechniczne	41,9
	– dokumentacja wykonawcza	4,0
	– przygotowawcze, regulacyjno-kontrolne	2,1
b)	turbozespoły z oprzyrządowaniem	29,0
2	Nakłady pośrednie:	12,5
	– ubezpieczenie	0,5
	– nadzór inwestycji (własny i inspektorzy)	2,7
	– odsetki okresu budowy	2,7
	– dzierżawa gruntu	0,1
	– koszty wspólne	3,3
	– inne	3,2
3	RAZEM	100,0

Nakłady inwestycyjne na budowę elektrowni wodnych są ściśle uwarunkowane warunkami lokalizacyjnymi, do których należą [6]:

- warunki geologiczno-inżynierskie (grodzie, zakres odwodnienia, zakres stosowania ścianek szczelnych konstrukcyjnych itp.),
- powiązanie z istniejącą budowlą piętrzącą (dodatkowy filar działowy, zabezpieczenie budowli piętrzącej z uwagi na różnice w posadowieniu, zapewnienie dodatkowego dojścia i dojazdu do stopnia, spełnienie dodatkowych wymagań głównego użytkownika stopnia itp.),
- możliwość dzierżawy gruntu lub konieczność wykupu od osób prywatnych,
- konieczność wycinki drzew i krzewów,
- występowanie kolizyjnych budowli i instalacji (cieki wodne, rowy melioracyjne, obwałowania, instalacje itp.),
- możliwości powiązania z siecią elektroenergetyczną.

Należy pamiętać, że obciążanie inwestora kosztami budowy piętrzenia przy realizacji elektrowni czynią inwestycję nieefektywną.

Zgoda na budowę i użytkowanie elektrowni wodnej warunkowana jest często spełnieniem różnego rodzaju wymagań technicznych i ekonomicznych stawianych przez gospodarza rzeki i urządzeń piętrzących (RZGW – Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej i WZMiUW – Wojewódzki Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych). Stawiane są wymagania częściowego ponoszenia przez elektrownie kosztów utrzymania budowli piętrzących, a nawet ich modernizacji, budowy przepławki bądź wykonania innych zadań związanych z ochroną

środowiska. Wymagania udziału w kosztach eksploatacyjnych stopnia wodnego stawiane są zarówno w stosunku do nowobudowanych elektrowni, jak również będących w eksploatacji. Obciążenie elektrowni (często dość wysokimi) kosztami utrzymania stopni i odcinków rzek powoduje pogorszenie opłacalności uzyskiwania energii z odnawialnych źródeł.

W tabeli 2 przedstawiono nakłady inwestycyjne i jednostkowe dla kilkunastu obiektów w zależności od mocy zainstalowanej elektrowni wodnej, z kolei w tabeli 3 dla celów porównawczych przedstawiono nakłady jednostkowe, jakie występują przy większości inwestycji hydroenergetycznych.

Udział nakładów na hydrozespoły w całkowitych nakładach nw. elektrowni waha się w granicach 25÷60%. Im wyższa moc, tym udział nakładów na turbozespoły wzrasta.

Tabela 2. Moc obiektów w funkcji nakładów inwestycyjnych elektrowni wodnych w ciągu ostatnich kilku lat (na podstawie opracowania Energoprojekt Warszawa)

Table 2. Power properties as a function of hydropower investment over the past few years (based on Energoprojekt Warsaw)

Moc obiektów	Nakłady całkowite i jednostkowe (ceny, pozycja, styczeń 2005 r.)		
	[mln zł]	[tys. zł/kW]	[tys. zł/MWh]
Do 1 MW	2,5-7	8-15,5	1,5-2,5
1-5 MW	16-25	8-17	2,2-3
Powyżej 5 MW	Powyżej 30	5-11,5	1,4-2,3

Tabela 3. Jednostkowe nakłady inwestycyjne dla elektrowni wodnych

Table 3. Unit investment for hydropower plants

Przykładowe elektrownie wodne	Nakłady jednostkowe [tys. zł/kW]			Nakłady jednostkowe na elektrownię zł/MWh
	cały stopień	w tym elektrownia	% udziału hydrozespołu w nakładach na elektrownię	
Duże elektrownie przepływowe	10-18	5-9	45-60	1700-2000
Małe elektrownie o mocy poniżej 5 MW, spad >10 m	–	6-10	25-30	1400-2300
Mikroelektrownie do 100 kW	10-14	3-6	różny	600-1200
Modernizacja elektrowni	–	1,5-10	70-80	1000-3000

Koszty stałe wytwarzania w elektrowniach wodnych obejmują:

- amortyzację (średnio dla nowo budowanych 5÷6%, dla modernizacji około 8%),
- opłaty za eksploatację,
- ubezpieczenie majątku,
- podatki lokalne, ewentualnie opłaty za korzystanie ze sprzężenia,

- remonty (stanowią średnio od 0,4 do 2% od nakładów inwestycyjnych),
- opłaty za dzierżawę gruntów,
- ochrona majątku,
- wynagrodzenia,
- zużycie materiałów i energii, pozostałe.

Analizując koszty wytwarzania w elektrowniach wodnych, można oszacować, że wahają się one od około 200 zł/MWh dla małych elektrowni, do około 150 zł/MWh dla elektrowni powyżej 10 MW; po zamortyzowaniu analogicznie od 140 zł/MWh do około 40 zł/MWh [5].

Jednocześnie należy zwrócić uwagę na aspekt całkowicie pomijany w analizach a określany jako korzyści utracone przez inwestora z tytułu funkcji, jakie spełniają wybudowane elektrownie wodne oprócz efektów stricte energetycznych, a mianowicie: stabilizacja stanów wody, zaopatrzenie w wodę, ochrona przeciwpowodziowa i inne. Inwestor nie uzyskuje z tego tytułu żadnych przychodów poprzez np. opłaty na jego rzecz; natomiast musi ponosić koszty utrzymania budowli piętrzących i modernizacji kanałów, które nie są związane bezpośrednio z elektrownią.

W obecnych warunkach formalnoprawnych modernizowanie budowli piętrzących powoduje znaczne obniżenie efektywności projektów budowy elektrowni wodnych, w związku z czym należy dążyć do sytuacji, w której koszty związane z taką modernizacją będą przeniesione w całości bądź części na podmioty zewnętrzne, tj. Skarb Państwa (RZGW), zakłady wodociągowe, gminy i inne.

4. WYBÓR ELEKTROWNI RZECZNYCH O MAŁYCH NAKŁADACH

Sygnalizując podstawowe grupy kosztów należy stwierdzić, że są one jedynie reprezentatywne, lecz zasadnym jest wstawienie ich wartości w tabelę obliczeniową Excel.

Przykładowe zestawienie mocy, źródeł i kosztów inwestycji małych elektrowni wodnych (MEW) podano w tabeli 4. Informacje o poniższych pozycjach są dostępne w księgowości: podatek od nieruchomości, podatek od budowli, dzierżawa gruntów i ewentualnie budowli, opłata z tytułu użytkowania instalacji piętrzącej, opłata roczna za oddanie w użytkowanie gruntów trwale pokrytych wodami, koszty eksploatacji bieżących remontów, obsługa i konserwacja, amortyzacja, koszty partycypacji w utrzymaniu brzegów i koryta rzeki, obsługa księgowo-dokumentacyjna oraz biurowa dla celów podatkowych i zbytu świadectw-certyfikatów, ubezpieczenie, podatek dochodowy i podatek VAT oraz akcyza od przychodów.

Tabela 4. Zestawienie wybranych i rozpoznanych transakcji elektrowniami wodnymi z lat 2010-2011 [11]
 Table 4. Summary of selected transactions of hydropowers from the years 2010 to 2011 [11]

MEW nazwa	Moc [kW]	Rzeka	Cena [mln zł]
Kościelna Wieś	304	Prosna	3,50
Drawsko Pomorskie	90	Drawa	1,20
Białki	100	Liwa	0,45
Ośno Lubuskie	15	Ośnianka	0,07
Radicz	50	Orla	0,35
Borowy Młyn	50	Kanał Borowy Młyn	0,30
Bolesławiec	70	Kanał Mosiński	0,35
Resko	120	Rega	4,50

Metoda parametryczna oszacowania wartości rynkowej małej elektrowni wodnej „standard Solskiego zalecany do stosowania”:

$$MEW = p \cdot s \cdot 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d \quad (4)$$

gdzie:

- p – przepływ wody,
- s – spad wody,
- 8 – współczynnik hydrotechniczny dla obliczenia mocy MEW przy znanym „p” i „s”,
- a – 9: współczynnik obliczenia produkcji energii za 1 MWh do mocy w KW wykorzystywanej rocznie (8760h),
- b – 10: stopa zwrotu z inwestycji uzyskana z analiz budżetów uruchomionych i pracujących przedsiębiorstw,
- c – 500: przychód, cena uzyskiwana ze sprzedaży energii i świadectw ekologicznej energii,
- d – 0,5: współczynnik sprawności finansowej projektu, wywiedziony z analiz poszczególnych MEW i otoczenia rynkowego energetyki odnawialnej z wód, uwzględniający: straty, koszty, wahania nurtu cieku, podatki i daniny, stan rynku podaży i popytu, ryzyko polityki ekologicznej państwa jako podmiotu dominującego.

Przyjmuje się jednak, że moc MEW [kW] zwielokrotniona 20.000 razy da orientacyjną cenę szacowanej wartości przedsięwzięcia.

Koszty budowy urządzeń MEW, bez ceny pozyskania praw do gruntów i wykorzystania cieku, mieszczą się w przedziale od 3.000 zł do 10.000 zł za każdy 1 kW mocy zainstalowanej.

5. PODSUMOWANIE

Zaletami elektrowni wodnych, co jest także potwierdzeniem tego, że należy podjąć się inwestycji, budowy i eksploatacji, są:

- 1) wytwarzanie czystej ekologicznie energii elektrycznej, wykorzystując naturalne, odtwarzalne źródło energii wody płynącej w ciekach – elektrownie

- wodne nie zanieczyszczają powietrza atmosferycznego spalinami, pyłami, popiołami, nie wytwarzają ścieków zanieczyszczających glebę i wodę.
- 2) zużywanie niewielkich ilości energii na potrzeby własne, około 0,5-1,0%, przy około 10% w przypadku elektrowni tradycyjnych.
 - 3) stosunkowo długi czas wykorzystania w ciągu roku mocy instalowanej; w zależności od charakterystyki hydrologicznej rzeki, dla elektrowni przepływowych o przepłyku instalowanym około SSQ jest to nawet do około 5500÷6500 h/a,
 - 4) niewielka pracochłonność – przy pełnej automatyzacji są praktycznie bezobsługowe, do ich obsługi wystarcza sporadyczny nadzór techniczny, np. dla MEW tzw. dyżur domowy.

W wyniku intensywnego eksploatowania zasobów naturalnych istnieje silna potrzeba rozwijania odnawialnych źródeł energii, takich jak małe elektrownie wodne. Nie należy jednak zapominać, że pojęcie „odnawialne” nie jest równoznaczne z „ekologiczne”. Równocześnie trzeba pamiętać, że lokalizacja miejsc do budowy elektrowni wodnych nie może być podyktowana wyłącznie czynnikami przyrodniczymi. Władza administracyjna zezwala na budowę piętrzeń tylko w przypadkach, gdy decyzja ta jest podyktowana względami bezpieczeństwa lub społecznymi, w związku z czym warto wykorzystywać narzędzia GIS do przekonywania urzędów administracji publicznej, o znaczeniu piętrzenia na rzekach, na których występuje wysokie ryzyko powodziowe, by następnie lokalizować przy nowo powstałych piętrzeniach elektrownie wodne. Systemy informacji geograficznej znacząco usprawniają proces wyszukiwania nowych lokalizacji pod budowę małych elektrowni wodnych. Wszystkie charakterystyki MEW można zilustrować graficznie za pomocą map oraz przy użyciu porównań tabelarycznych wybrać potencjalnie najlepsze obszary. Analizy geoinformacyjne usprawniają proces wyszukiwania, czyniąc go bardziej obiektywnym i skutecznym.

LITERATURA

- [1] DMOWSKI A.: Odnawialne Źródła Energii – możliwości i ograniczenia w warunkach polskich. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [2] ENGEL J., JELONEK M.: Środowiskowe kryteria lokalizowania MEW. Materiał roboczy, 1.12.2010.
- [3] FLIZIKOWSKI J.: Raporty. Materiał roboczy, 20.12.2011: Badanie założeń konstrukcyjnych do stanowiska badawczego, badanie poszczególnych podzespołów turbiny.
- [4] HOFFMAN M.: Poradnik M.E.W., Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1992, 4.
- [5] KOWALCZYK P., NIEZNAŃSKI P., STAŃKO R., MAS F.M., SANZ M.B.: Natura 2000 a gospodarka wodna. Wydawnictwo Ministerstwa Środowiska Warszawa, 2009.
- [6] MATUSZEK W.: Polskie Sieci Elektroenergetyczne SA. Elektroenergetyka 1(52), 2005.
- [7] Obszary NATURA 2000 stanowią system ochrony dziedzictwa naturalnego w Unii Europejskiej. Ochronie podlegają obszary specjalnej ochrony ptaków oraz specjalne obszary ochrony siedlisk, <http://natura2000.gdos.gov.pl/>.
- [8] Prawo Wodne, Dz.U. 2001 r. nr 115.

- [9] Sprawozdanie z I etapu badań: „Nowatorska elektrownia rzeczna o małych nakładach inwestycyjnych z turbiną ślimakową”. Projekt Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, Zakładu Maszyn Elektrycznych – Centrum Techniki Okrętowej (CTO), Gdańsk, Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk, 2010.
- [10] WILKOWSKI M.: Oplacalność elektrowni wodnych, <http://michalwilkowski.matemat.pl/34985,oplacalnosc-elektrowni-wodnych> (dostęp 11.10.2012).
- [11] www.ptm.pl/praktyka/warsztat-wyceny/male-elektrownie-wodne-warto-cenic-wartosc.

SMALL RIVER POWER PLANTS

Summary: The article says about small hydroelectric power plants due to their unused potential in Poland. The predominant lowland topography is not conducive to building a power plant on the rivers, but there are still unused rivers stretches on which you can install small hydropower plants. To find the optimum location for the plants should not only consider economical aspects, but also environmental and social. This article is also about searching for a rational location of plants with the use of Geographic Information Systems. This was achieved primarily by the presentation of the investment costs (construction costs of their building).

Key words: investment, technical considerations and legal aspects – economic development of hydropower, the balance of economic construction and exploitation of hydroelectric power plant choice for small editions river