

Andrzej WROŻYNA, Roman KUZIĄK

Instytut Metalurgii Żelaza

OPRACOWANIE TECHNOLOGII PRODUKCJI ODKUWEK DLA PRZEMYSŁU MOTORYZACYJNEGO ZE STALI WĘGLOWYCH I ŚREDNIOSTOPOWYCH Z ZASTOSOWANIEM INDUKCYJNEGO NAGRZEWANIA WSADU

Artykuł prezentuje rezultaty badań przeprowadzonych w celu opracowania technologii kucia odkuwek dla przemysłu motoryzacyjnego z zastosowaniem indukcyjnego nagrzewania półfabrykatów. Na podstawie przeprowadzonych symulacji fizycznych opracowano modele rozwoju mikrostruktury austenitu oraz przemian fazowych. Warunki brzegowe i początkowe nagrzewania indukcyjnego oraz kucia określono w doświadczeniach przemysłowych. Uzyskane dane oraz opracowane modele rozwoju struktury i przemian fazowych wykorzystano w czasie realizacji symulacji numerycznych analizowanych procesów nagrzewania i kucia.

Słowa kluczowe: stale średniowęglowe, nagrzewanie indukcyjne, symulacja numeryczna, próby przemysłowe

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING OF CARBON AND MEDIUM-ALLOY STEEL FORGINGS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY USING INDUCTION CHARGE HEATING

This article presents the results of research on development of technology for manufacturing of forgings for the automotive industry using the induction heating of semi-finished products. Based on physical simulations, the austenite microstructure development and phase transformation models were prepared. The boundary and initial conditions of induction heating and forging were determined in industrial experiments. The obtained data and structure development and phase transformation models were used in numerical simulations of the analysed heating and forging processes.

Key words: medium-carbon steels, induction heating, numerical simulation, industrial tests

1. WPROWADZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w projekcie celowym, które wykorzystano do opracowania technologii indukcyjnego nagrzewania półfabrykatów do kucia odkuwek, przeznaczonych do produkcji podzespołów zawieszenia samochodów ciężarowych i przyczep. Wprowadzenie indukcyjnego nagrzewania półfabrykatów przed kuciem skraca czas grzania materiału w porównaniu do metod konwencjonalnych i dzięki temu zmniejsza rozrost ziarna austenitu oraz redukuje koszty związane z nagrzewaniem [1–3].

Charakter rozkładu temperatur oraz zmian strukturalnych w trakcie nagrzewania indukcyjnego przeanalizowano w oparciu o wyniki symulacji numerycznych. Symulacje nagrzewania indukcyjnego zrealizowano przy współpracy z kadrą naukową Katedry Informatyki Stosowanej i Modelowania w Akademii Górniczo-Hutniczej ze względu na posiadane przez ten ośrodek oprogramowanie do symulacji zmian właściwości magnetycznych i elektrycznych oraz doświadczenie w zakresie modelowania tego typu zjawisk.

2. MATERIAŁ DO BADAŃ I METODYKA BADAWCZA

Skład chemiczny stali C45 przedstawiono w tablicy 1, a wymagania odbiorcze wobec odkuwek z tych stali – w tablicy 2.

Symulacje fizyczne prowadzono z zastosowaniem symulatora procesów metalurgicznych Gleeble 3800 oraz dylatometru odkształceniowego DIL 805 A/D. Symulacje numeryczne kucia odkuwek przeprowadzono z wykorzystaniem programu FORGE. Warunki charakteryzujące proces oraz właściwości badanych materiałów określono na podstawie symulacji numerycznej nagrzewania indukcyjnego, prób przemysłowych, symulacji fizycznej kucia oraz opracowanego modelu rozwoju mikrostruktury.

W ramach prób przemysłowych określono przebieg zmian temperatury półfabrykatów w czasie nagrzewania indukcyjnego oraz kucia. W tym celu zastosowano kamerę termowizyjną FLIR SC 660 oraz zestaw termopar umieszczonych w wybranych miejscach półfabrykatów. Przeprowadzono także pomiary zmian długości i szerokości półfabrykatów pod wpływem nagrzewania

Tablica 1 Skład chemiczny stali C45, % mas.

Table 1 Chemical composition of C45 steel, % wt

Gatunek	C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo	Ni
C45	0,42–0,50	0,20–0,35	0,50–0,80	0,045	0,045	0,12–0,17	0,05–0,07	0,10–0,15

Tablica 2 Oczekiwane wartości właściwości mechanicznych poszczególnych rodzajów określone na podstawie wymagań przez klientów odbiorców odkuwek

Table 2. Expected values of mechanical properties of individual types determined according to the requirements of forging recipients

Stal	Przeznaczenie odkuwki	R _e	R _m	A ₅	udarność (KV, KCU)
C45	złącze Cardana, korbówód	>430 MPa	650-750 MPa	>15%	>30 J/cm ² (KCU)

indukcyjnego. Wyniki uzyskane w próbach przemysłowych wykorzystano jako dane wejściowe do symulacji numerycznej oraz do weryfikacji opracowanej technologii nagrzewania indukcyjnego.

2. SYMULACJE FIZYCZNE

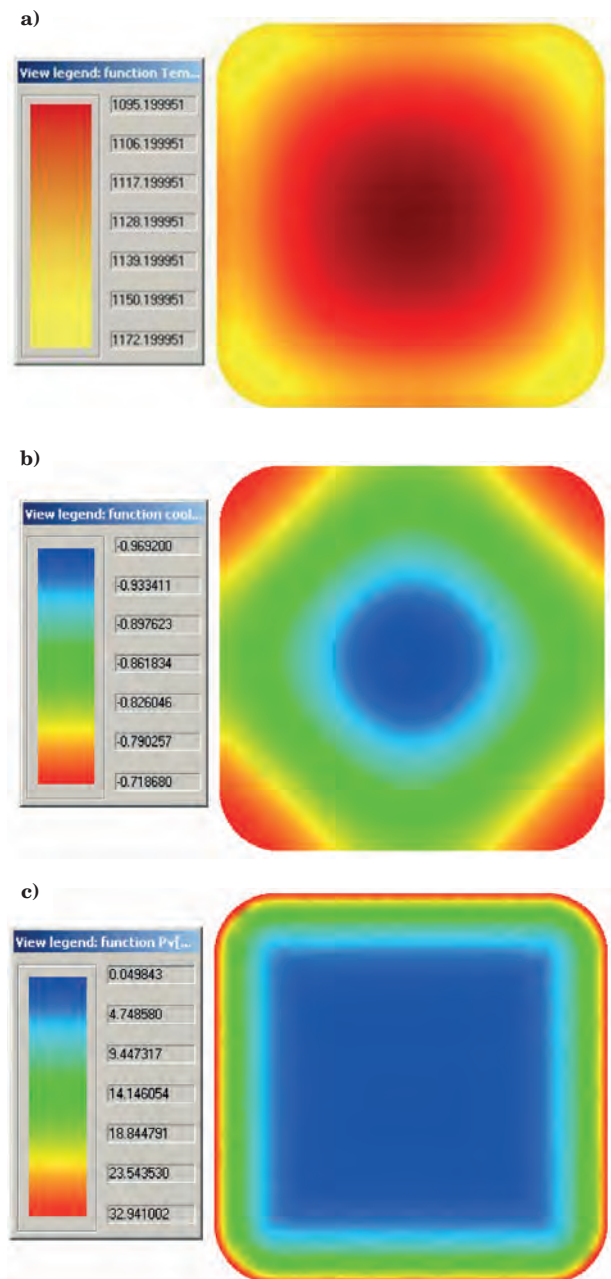
Symulacje fizyczne przeprowadzono w celu wyznaczenia charakterystyk materiałowych badanych stali oraz określenia warunków brzegowych i początkowych procesów nagrzewania indukcyjnego oraz kucia. Model zmian mikrostruktury stali w procesie obróbki cieplno-plastycznej opracowano w oparciu o metodę relaksacji naprężenia w doświadczeniach z wykorzystaniem symulatora Gleeble 3800 oraz z zastosowaniem ilościowej oceny mikrostruktury odkształconych próbek. Wykresy czas-temperatura-przemiana opracowano na podstawie danych z badań dylatometrycznych wykonanych na dylatometrze odkształceniowym DIL 805 A/D. Weryfikację wyników badań dylatometrycznych przeprowadzono w badaniach metalograficznych poprzez ocenę składu fazowego próbek. Badania dylatometryczne obejmowały także odwzorowanie profilu temperaturowego zgodnego z przebiegiem indukcyjnego nagrzewania materiału zarejestrowanego w próbach przemysłowych. Wyniki badań zawarto w sprawozdaniach [4–6].

Opracowane modele rozwoju mikrostruktury austenitu umożliwiły modelowanie zmian strukturalnych w procesach obróbki cieplno-plastycznej, a model przemian fazowych dał możliwość określenia przebiegu przemian fazowych (temperatur początku końca przemian, udziałów składników fazowych) w objętości nagrzewanych półfabrykatów i odkształconych odkuwek. Oba modele zostały zastosowane w symulacjach numerycznych procesu kucia w programie FORGE.

3. SYMULACJE NUMERYCZNE

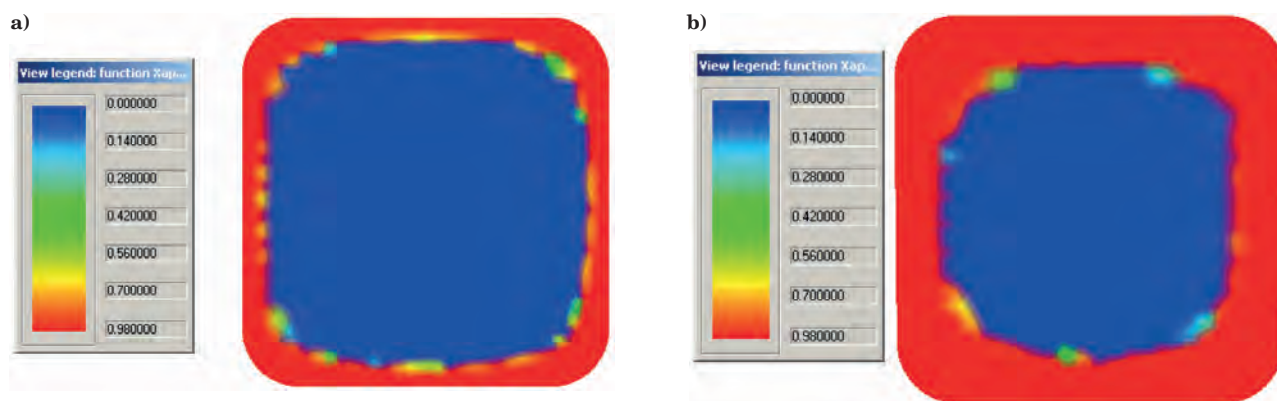
3.1. SYMULACJA NAGRZEWANIA INDUKCYJNEGO

W symulacji numerycznej indukcyjnego nagrzewania półfabrykatów przeznaczonych do kucia analizowano zmiany rozkładu pola temperatury oraz wielkości ziarna austenitu w nagrzewanym materiale. Wielkość ziarna austenitu wykorzystano następnie jako parametr wejściowy do symulacji numerycznej procesu kucia. Do poprawnego opisu nagrzewania indukcyjnego konieczne było równoczesne rozwiązanie sprzężonych układów równań opisujących rozkład pola magnetycz-



Rys. 1. Wyniki obliczeń w symulacji nagrzewania indukcyjnego stali C45 po zakończeniu nagrzewania (czas $t = 600$ s): a) temperatura, b) prędkość zmiany temperatury, c) rozkład gęstości generowanego ciepła

Fig. 1. Results of calculations in simulation of C45 steel induction heating at the end of heating (time $t = 600$ s): a) temperature, b) temperature change rate, c) distribution of generated heat density



Rys. 2. Rozkład udziału objętościowego austenitu w trakcie nagrzewania indukcyjnego stali C45: a) po czasie nagrzewania $t = 180$ s, b) po czasie nagrzewania $t = 240$ s

Fig. 2. Distribution of austenite volume fraction during induction heating of C45 steel: a) after heating time $t = 180$ s, b) after heating time $t = 240$ s

nego, elektrycznego i temperatury w rozważanym materiale. Uwzględniono przy tym związek między właściwościami cieplnymi, magnetycznymi i elektrycznymi, w tym zmianę przewodnictwa elektrycznego i ciepłego materiału w funkcji temperatury.

Program umożliwiający uzyskanie poprawnych wyników symulacji nagrzewania indukcyjnego został opracowany w Katedrze Informatyki Stosowanej i Modelowania w Akademii Górniczo-Hutniczej. Dane materiałowe określono w trakcie symulacji fizycznych, na podstawie literatury [3] oraz własnych obliczeń prowadzonych w programach ThermoCalc i JMatPro. Rzeczywisty przebieg procesu nagrzewania indukcyjnego określono w trakcie prób przemysłowych. Przykład wyników symulacji dla półfabrykatu ze stali C45 o przekroju kwadratowym 95 mm z zaokrąglonymi narożnikami (promień zaokrąglenia około 15 mm) uzyskanych w opracowanym programie przedstawiono na rys. 1 i 2.

W przeprowadzonych symulacjach wykazano, że materiał półfabrykatu nie nagrzewa się równomiernie. Maksimum rozkładu temperatury znajduje się w narożach, następnie w obszarze przypowierzchniowym (rys. 1). Pod koniec nagrzewania temperatura w środku półfabrykatu jest o około 80°C niższa w porównaniu z temperaturą przy powierzchni. Przemiana struktury pierwotnej (perlityczno-ferrytycznej) w austenit rozpoczyna się od powierzchni półfabrykatu zgodnie ze zmianami temperatury. Po upływie 180 sekund przemiana w austenit jest zakończona w przypowierzchniowym obszarze o grubości około 6 mm, a po upływie 240 sekund w obszarze o grubości około 12 mm (rys. 2). Natomiast w obszarze środkowym przemiana nadal jest w fazie początkowej – udział austenitu wynosi około 20%. W konsekwencji takiego przebiegu przemiany, ziarno austenitu jest większe w obszarze przy powierzchni w porównaniu do środka półfabrykatu (rys. 1d).

3.2. SYMULACJA NUMERYCZNA KUCIA

W symulacjach numerycznych kucia odkuwek przyjęto – zgodnie z wynikami badań przemysłowych – niejednorodny rozkład temperatury w półfabrykacie, przedziały czasowe między etapami procesu oraz wartości innych parametrów technologicznych (tablica 3). Schemat odkształcania odkuwki złącza Cardana oraz geometrię zastosowanych wykrojów przedstawiono na rys. 3. Temperatury powierzchni zastosowanych trzech wykroi (stanowiących wkładki umieszczone we wspólnych obudowach) przyjęto zgodnie z danymi z prób przemysłowych – dla dolnej obudowy temperatury wynosiły odpowiednio: 170, 150, 130°C , a w górnej obudowie – wynosiły odpowiednio: 100, 150, 100°C . Prędkość przemieszczania się górnej matrycy prasy wynosiła 667 mm/s.

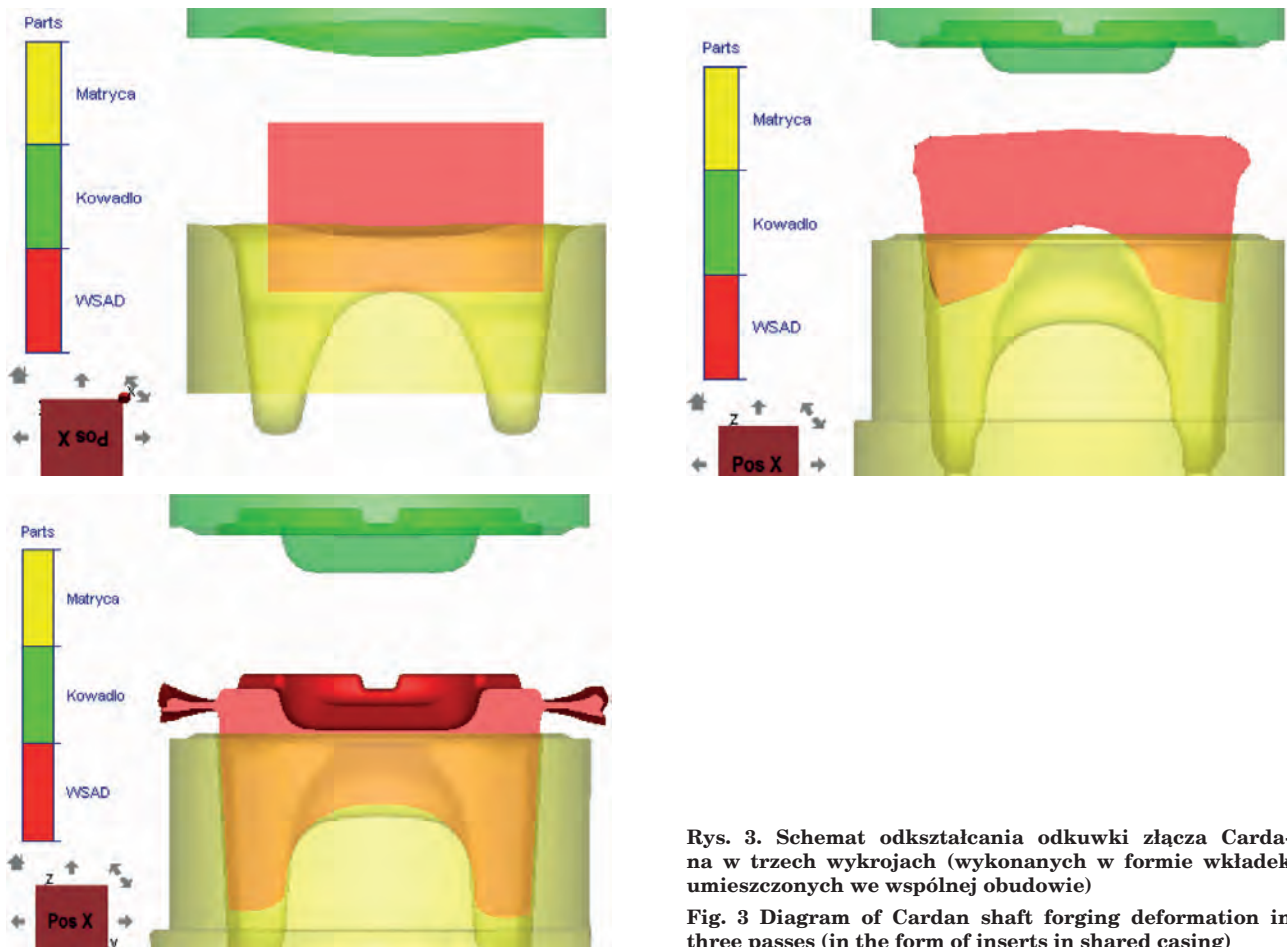
Dodatkowe parametry termofizyczne niezbędne do symulacji numerycznej procesu kucia pobrano z bazy danych programu FORGE (w celu przyspieszenia obliczeń część wartości uśredniono dla zakresu temperatur procesu kucia na gorąco).

W ramach symulacji numerycznej kucia przeprowadzono analizę wpływu nierównomiernego rozkładu temperatury na przekroju półfabrykatu oraz jego asymetrycznego umieszczenia w matrycy na sposób płynięcia materiału, a poprzez to na uzyskiwany kształt odkuwek. Weryfikację uzyskanych w symulacji kształtów odkuwek przeprowadzono poprzez porównanie z kształtem odkuwek rzeczywistych. Przykład takiego porównania przedstawiono na rys. 4. Kształt odkuwki został dobrze odwzorowany w trakcie symulacji numerycznej. Pewne rozbieżności występują w obszarze wpływu, co prawdopodobnie wynika z efektu utraty objętości podczas symulacji numerycznej. W zrealizowanych metodą elementów skończonych symulacjach procesu kucia określono rozkład: pola odkształcenia, prędkości odkształcenia, temperatury i wartości naprę-

Tablica 3. Średnie przedziały czasowe między kolejnymi etapami procesu kucia i chłodzenia

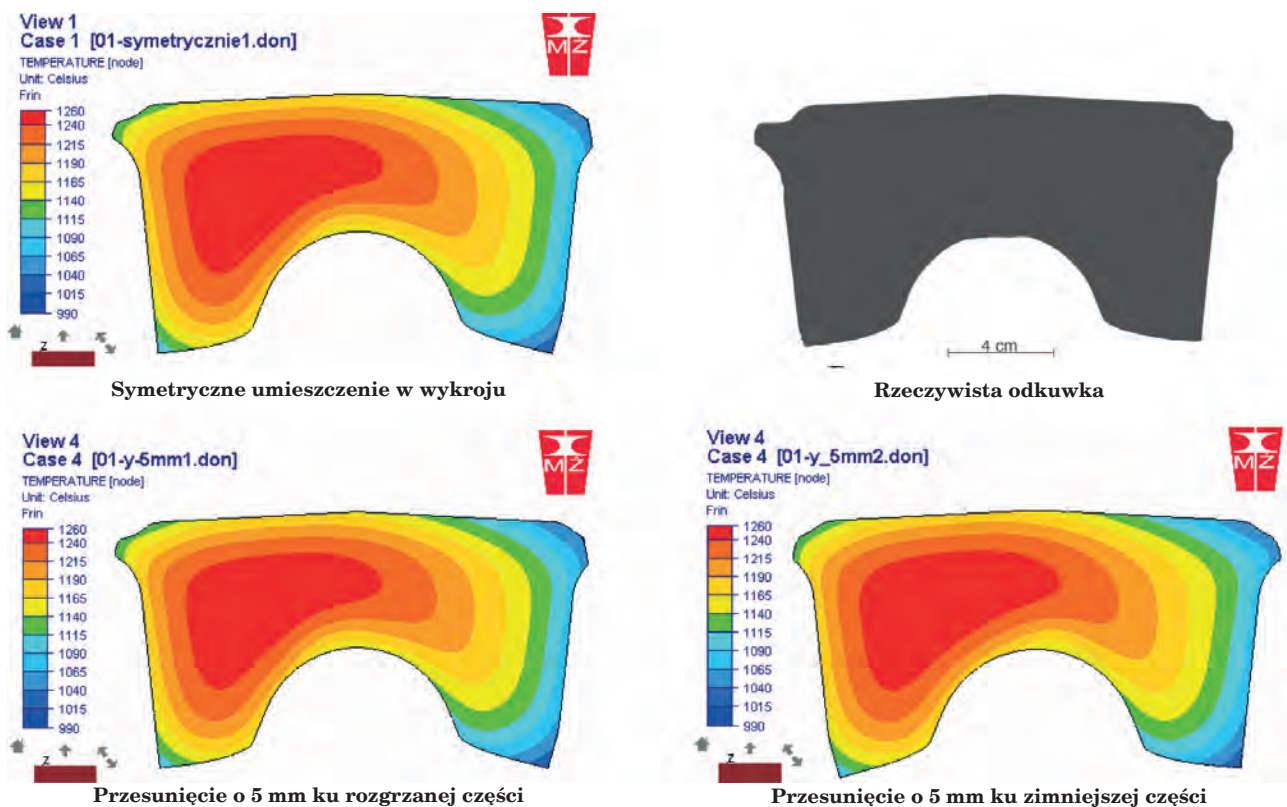
Table 3 Average time intervals between consecutive stages of the forging and cooling process

Lp.	Etap zakończony – etap kolejny	Czas
1	Nagrzewanie indukcyjne – Kucie w pierwszym wykroju	10 s
2	Kucie w pierwszym wykroju – Kucie w drugim wykroju	8 s
3	Kucie w drugim wykroju – Kucie w trzecim wykroju	5 s
4	Kucie w trzecim wykroju – Przyspieszone chłodzenie	10 s



Rys. 3. Schemat odkształcania odkuwki złącza Cardana w trzech wykrojach (wykonanych w formie wkładek umieszczonych we wspólnej obudowie)

Fig. 3 Diagram of Cardan shaft forging deformation in three passes (in the form of inserts in shared casing)



Symetryczne umieszczenie w wykroju

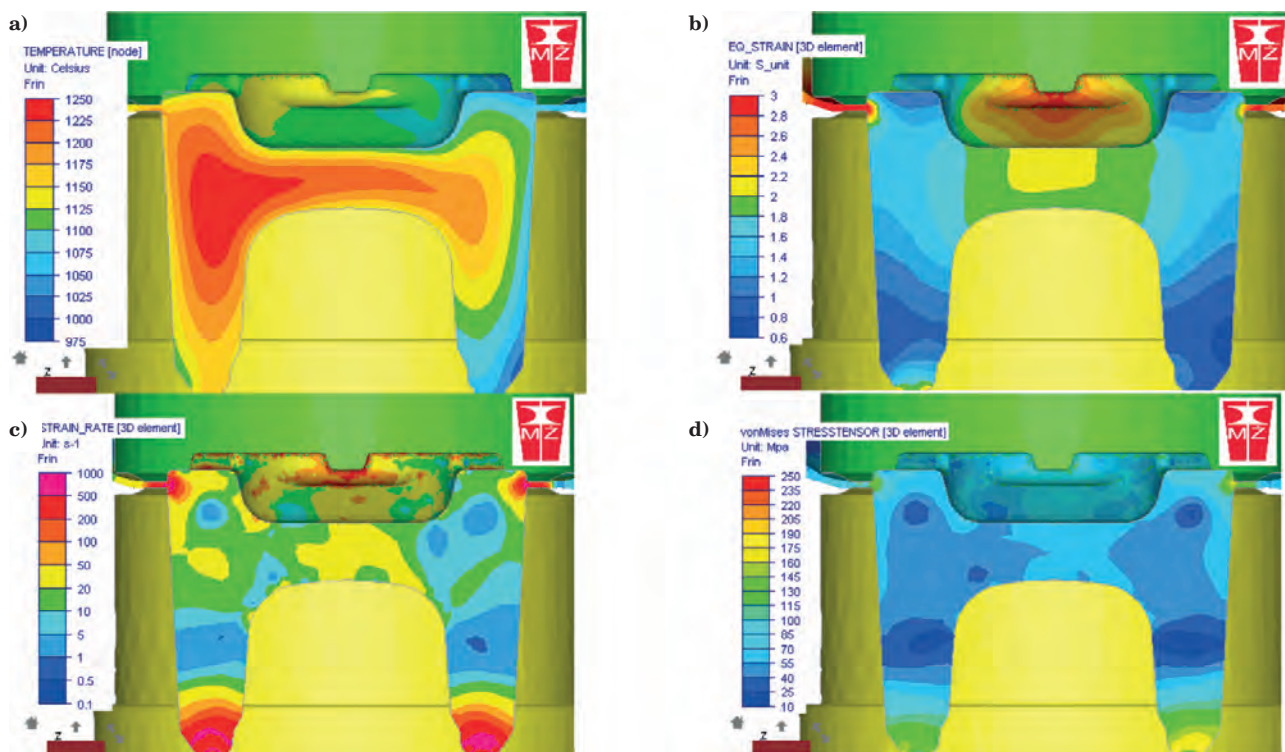
Rzeczywista odkuwka

Przesunięcie o 5 mm ku rozgrzanej części

Przesunięcie o 5 mm ku zimniejszej części

Rys. 4. Porównanie wybranych wyników symulacji płynięcia materiału dla przekroju poprzecznego po kuciu matrycowym w pierwszym wykroju z przekrojem rzeczywistej odkuwki

Fig. 4. Comparison of selected material flow simulation results for cross-section after die forging in the first pass to cross-section of real forging



Rys. 5. Rozkład pola temperatury (a), odkształcenia (b), prędkości odkształcenia (c) oraz wartości naprężenia uplastyczniającego (d) w odkuwce uzyskanej w trzecim wykroju

Fig. 5. Distribution of temperature field (a), strain (b), strain rate (c) and flow stress values (d) in forging obtained in the third pass

żenia uplastyczniającego w każdym wykroju. Obliczone rozkłady dla odkuwki kształtowanej w trzecim wykroju przedstawiono na rys. 5.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji numerycznych kucia nie stwierdzono znaczącego wpływu nierównomiernego rozkładu temperatury na przekroju półfabrykatu oraz jego niesymetrycznego umieszczenia w matrycy na płynięcie materiału oraz rozkład wielkości odkształcenia lub naprężenia uplastyczniającego podczas odkształcania w kolejnych wykrojach. Nieznaczną asymetrię stwierdzono jedynie w rozkładzie szybkości odkształcania.

4. PRÓBY PRZEMYSŁOWE

4.1. OKREŚLENIE PARAMETRÓW PROCESU TECHNOLOGICZNEGO

Weryfikację przebiegu nagrzewania indukcyjnego przeprowadzono w trakcie prób przemysłowych. Rozkład pola temperatury określono poprzez pomiar kamerą termowizyjną FLIR SC 660 oraz za pomocą termopar umieszczonych w półfabrykatkach zgodnie z rys. 6. Przeprowadzono także pomiary długości i szerokości

półfabrykatów w temperaturze pokojowej oraz bezpośrednio po wyjściu z nagrzewnicy indukcyjnej w celu określenia wpływu rozszerzalności cieplnej materiału na ich dopasowanie do wykroju wstępnego matrycy. Wybrane egzemplarze półfabrykatów po zakończeniu nagrzewania (oraz odkuwek z kolejnych etapów kucia) były hartowane w celu zamrożenia struktury i określenia wielkości ziarna byłego austenitu. Ponadto przeprowadzono pomiary temperatury oraz czasów realizacji etapów kucia odkuwek, aby zweryfikować dane wejściowe do symulacji numerycznych.

Zmiany wymiarów geometrycznych półfabrykatów w wyniku rozszerzalności cieplnej na skutek nagrzewania indukcyjnego zestawiono w tablicy 4. W pomiarach wykorzystano półfabrykaty o wymiarach 90×90×158 mm. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że w czasie nagrzewania indukcyjnego objętość półfabrykatów ze stali C45 wzrasta o około 8%.

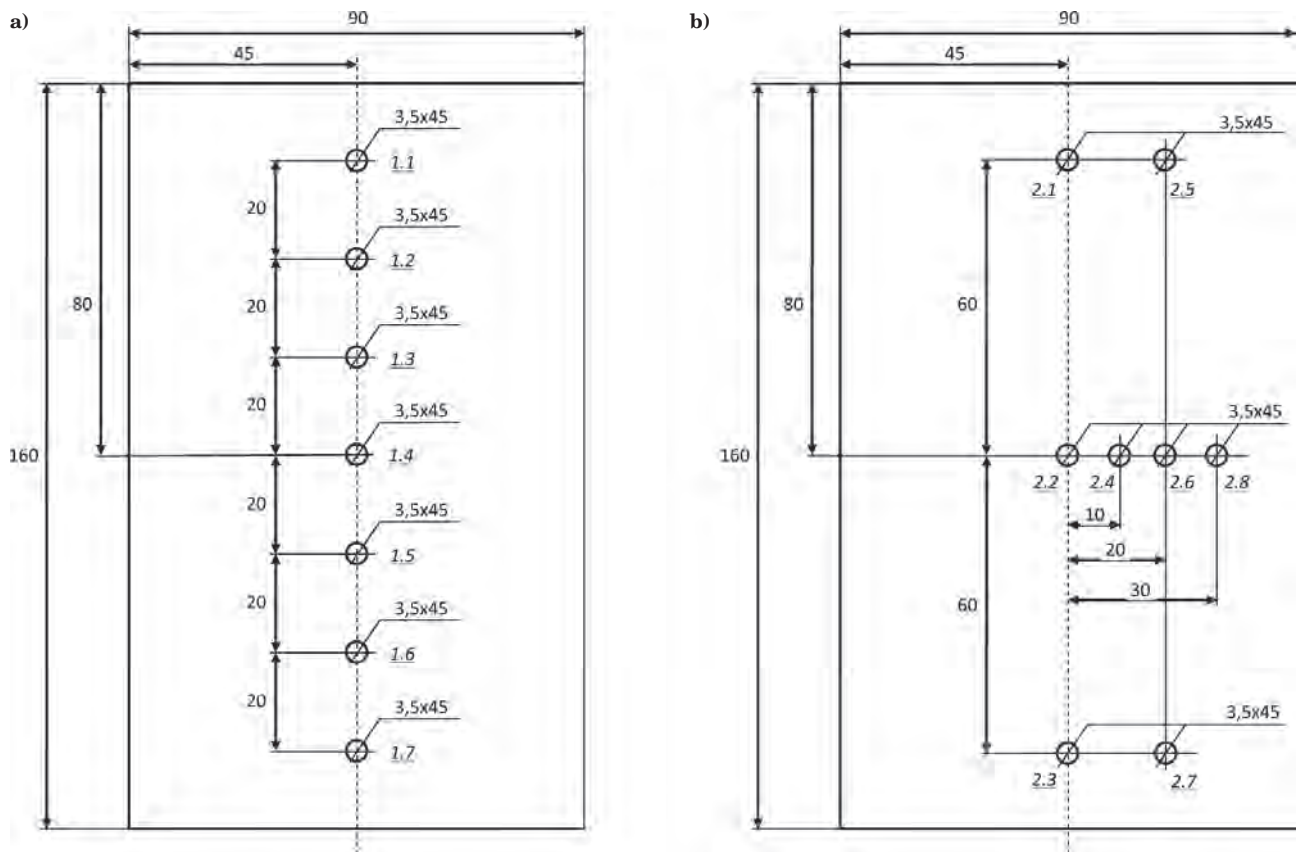
Przebieg zarejestrowanych zmian temperatury na przekroju poprzecznym i wzdłużnym nagrzewanych półfabrykatów ze stali C45 (termopary rozmieszczone zgodnie z rys. 6) przedstawiono na rys. 7.

Zestawienie wartości maksymalnych pików temperatury oraz czasów osiągnięcia maksymalnych wartości temperatury (w stosunku do chwili, gdy temperatura

Tablica 4. Zmiana wymiarów geometrycznych półfabrykatów ze stali C45 na skutek wzrostu temperatury materiału podczas nagrzewania indukcyjnego

Table 4. Change in geometrical dimensions of C45 steel semi-finished products as a result of increase in material temperature during induction heating

Gatunek stali / półfabrykat	Temperatura otoczenia		Temperatura końca nagrzewania (ok. 1200°C)		Zmiana objętości, %
	szerokość, mm	długość, mm	szerokość, mm	długość, mm	
C45 / 1	90,0	159,8	92,7	162,6	7,95
C45 / 2	89,7	159,6	92,6	162,4	8,44



Rys. 6. Sposób rozmieszczenia termopar w półfabrykacie_1 (a) oraz półfabrykacie_2 (b)

Fig. 6. Arrangement of thermocouples in semi-finished product_1 (a) and semi-finished product_2 (b)

po raz pierwszy wzrosła powyżej temperatury otoczenia) dla termopar w półfabrykacie_2 ze stali C45 przedstawiono w tablicy 5.

Rozkład temperatury na powierzchni półfabrykatu ze stali C45 bezpośrednio po zakończeniu indukcyjnego nagrzewania pokazano na rys. 8.

Z analizy rozkładu pola temperatury na powierzchni materiału (uzyskanego za pomocą kamery termowizyjnej) wynika, że temperatura półfabrykatów jest zróżnicowana na długości – najniższa jest na końcu, który jako pierwszy wychodzi z nagrzewnicy i wynosi około 1020°C. Temperatura rośnie do około 1100°C w połowie długości półfabrykatu i w dalszej części półfabrykatu pozostaje na tym samym poziomie. Dane z termopar wskazują, że przyrost temperatury w obszarach położonych bliżej powierzchni półfabrykatu jest szybszy niż w jego środku i prowadzi do uzyskania wyższej wartości temperatury maksymalnej. Z pomiarów wynika, że najwyższa wartość temperatury (wynosząca 1208°C) występuje w obszarze położonym w połowie długości półfabrykatu na głębokości 15 mm pod jego powierzchnią. Wartości temperatury maksymalnej zaobserwowane w obszarach w pobliżu początku i końca półfabrykatu były niższe o około 11÷15°C. Po upływie 10 s od zakończenia nagrzewania (czas transportu półfabrykatu na

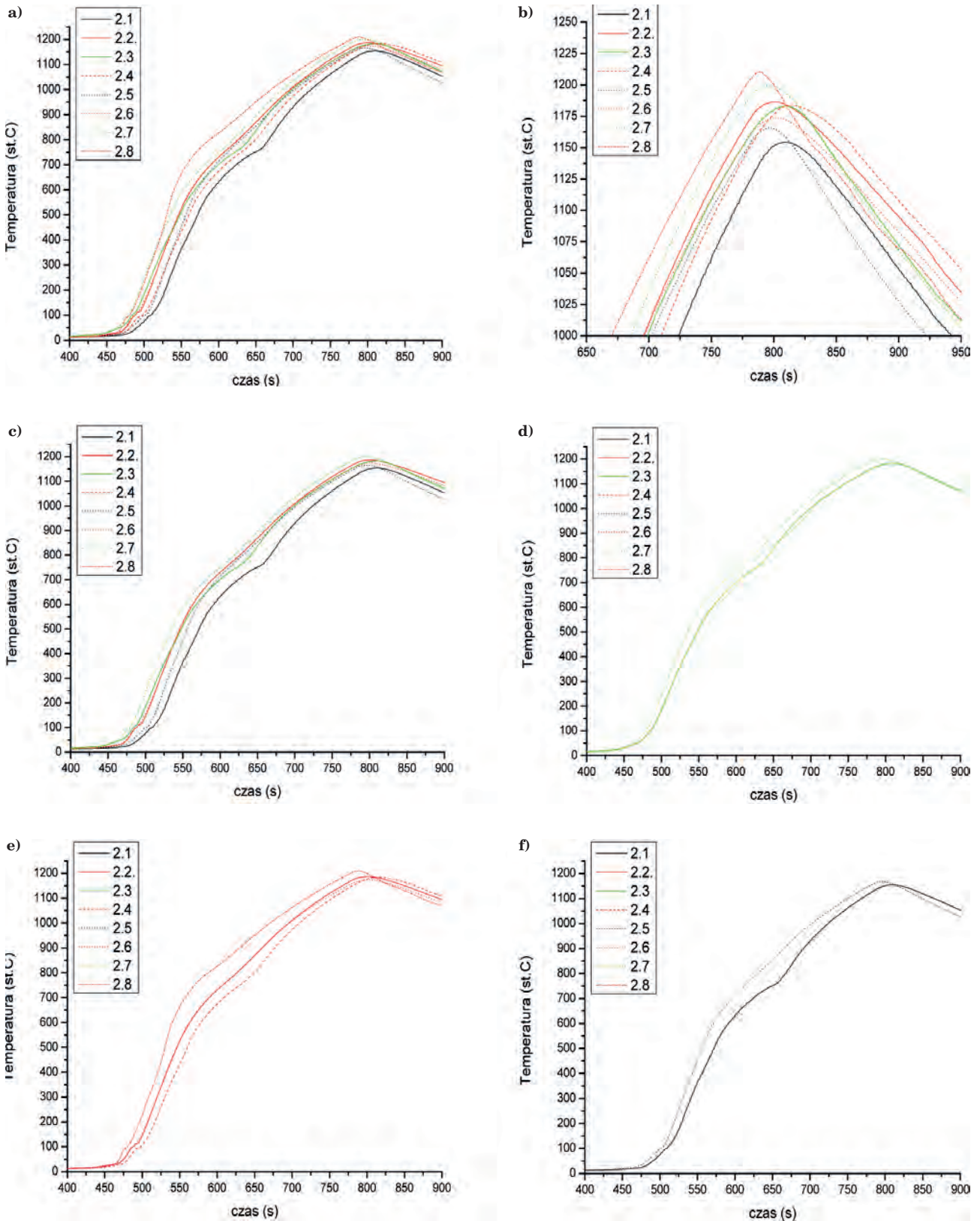
stanowisko kucia) różnica między temperaturą w połowie długości półfabrykatu (1203°C), a temperaturą na początku półfabrykatu zwiększyła się do $\Delta T = 32^\circ\text{C}$, natomiast różnica między temperaturą w połowie długości półfabrykatu, temperaturą na końcu półfabrykatu zwiększyła się do $\Delta T = 14^\circ\text{C}$. Największą różnicę między maksymalnymi wartościami pików temperatury na przekroju poprzecznym ($\Delta T = 36^\circ\text{C}$) zarejestrowano w połowie długości półfabrykatu.

Przebieg krzywych nagrzewania zarejestrowanych w czasie prób przemysłowych jest jakościowo zgodny przebiegiem krzywych otrzymanych podczas modelowania nagrzewania indukcyjnego, lecz po osiągnięciu punktu Curie różnica między nimi wzrasta do około 80°C. Analiza prawdopodobnych wartości punktu Curie (obliczonych w symulacji oraz wynikających z danych z prób przemysłowych) sugeruje, że zapisy z termopar mogły zostać zawyżone o około 80°C w wyniku działania pola elektromagnetycznego wzbudnika. Taka interpretacja znajduje potwierdzenie w zgodności wyników symulacji numerycznej z wartościami temperatury zarejestrowanej przez kamerę termowizyjną.

Niezależnie od ewentualnej korekty danych zarejestrowanych przez termopary, rezultaty wszystkich przeprowadzonych pomiarów świadczą o znacznie

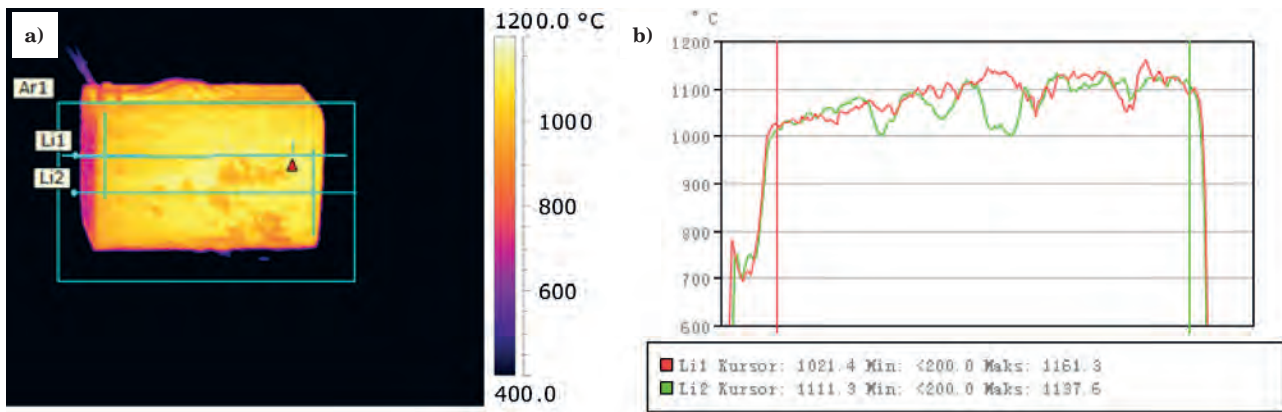
Tablica 5 Maksymalne wartości pików temperatury i czas osiągnięcia maksimum pików dla poszczególnych termopar w półfabrykacie_2 ze stali C45

Gatunek	Parametry maksimum pików	Oznaczenie termopar							
		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8
C45	temperatura, °C	1154	1186	1184	1174	1166	1183	1199	1210
	czas, s	428	423	430	423	415	434	410	409



Rys. 7. Przykład zmian temperatury w półfabrykacie_2 ze stali C45: a-b) wyniki pomiarów dla wszystkich termopar; c-f) porównanie zmian temperatury dla termopar w osi symetrii i oddalonych od osi o 20 mm (d – termopary na początku; e – w połowie długości; f – na końcu półfabrykatu). Przesunięcie wartości czasu widoczne na osi wykresów wynika z rozpoczęcia pomiaru w chwili wprowadzenia półfabrykatu do wzbudnika oraz z opóźnienia wzrostu temperatury w obszarach badanych za pomocą termopar z powodu ich położenia na określonej głębokości pod powierzchnią półfabrykatu

Fig. 7. Example of temperature changes in C45 steel semi-finished product 2: a-b) results of measurements for all thermocouples; c-f) comparison of temperature changes for thermocouples in the axis of symmetry and 20 mm away from the axis (d – thermocouples in the beginning; e – in half-distance; and f – at the end of semi-finished product). The reason for time value offset visible in the axis of diagrams is the fact of starting the measurement upon the introduction of semi-finished product into the heating inductor and delay in temperature increase in areas investigated using thermocouples because of their location at a specific depth under the semi-finished product surface



Rys. 8. Rozkład temperatury na powierzchni półfabrykatu ze stali C45 po zakończeniu nagrzewania: a) termogram półfabrykatu, b) profil liniowy rozkładu temperatury na powierzchni półfabrykatu

Fig. 8. Temperature distribution over C45 steel semi-finished product surface at the end of heating: a) semi-finished product thermogram, b) line profile of temperature distribution over semi-finished product surface

niejednorodności rozkładu temperatury w nagrzewanych indukcyjnie półfabrykatkach. Dlatego uzyskane w badaniach przemysłowych dane dotyczące rozkładu temperatury w objętości półfabrykatów wykorzystano do symulacji kucia odkuwek oraz analizy jego wpływu na geometrię i warunki odkształcania materiału.

4.2. BADANIA MATERIAŁOZNAWCZE PÓLFABRYKATÓW I ODKUWEK Z PRÓB PRZEMYSŁOWYCH

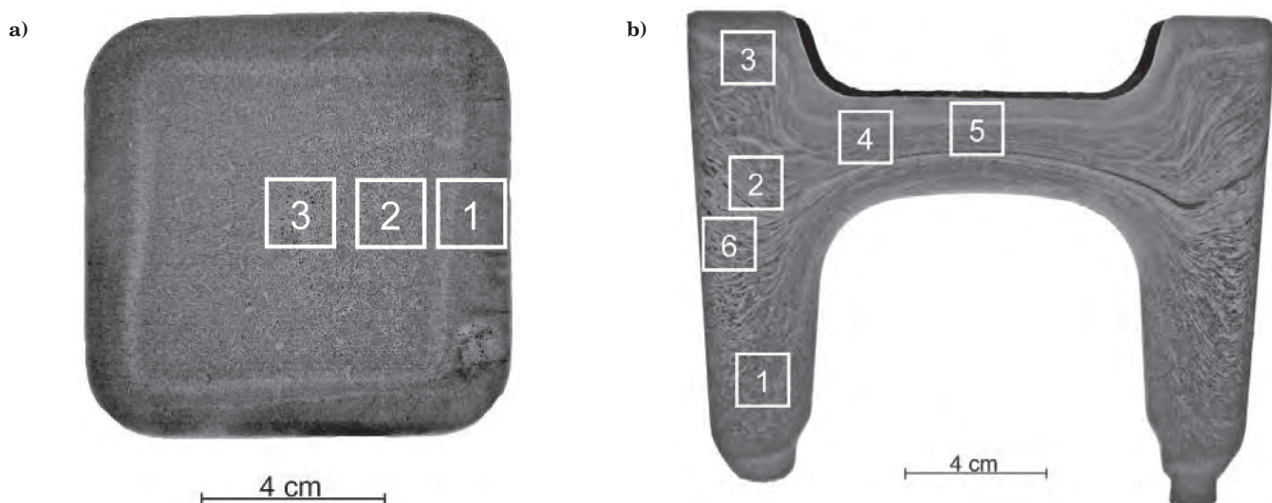
Badania materiałoznawcze obejmowały jakościową ocenę makro- i mikrostruktury, ilościową ocenę wielkości ziarna byłego austenitu w półfabrykatkach nagrzewanych indukcyjnie oraz w wykonanych z nich odkuwkach, a także badania właściwości mechanicznych tych odkuwek.

Przykład wyników badań makrostrukturalnych półfabrykatów oraz odkuwki elementu złącza Cardana ze stali C45 po kuciu w trzecim wykroju pokazano na rys. 9. W odkuwkach włókna układają się osiowo. W badaniach metodą głębokiego trawienia (zgodnie z PN-H-04501) nie stwierdzono obecności pęcherzy, pła-

tów i pęknięć wewnętrznych. Wtrącenia niemetaliczne nie były widoczne gołym okiem, a ich średnia wielkość nie przekraczała wzorca 3 (zgodnie z PN-H-04510).

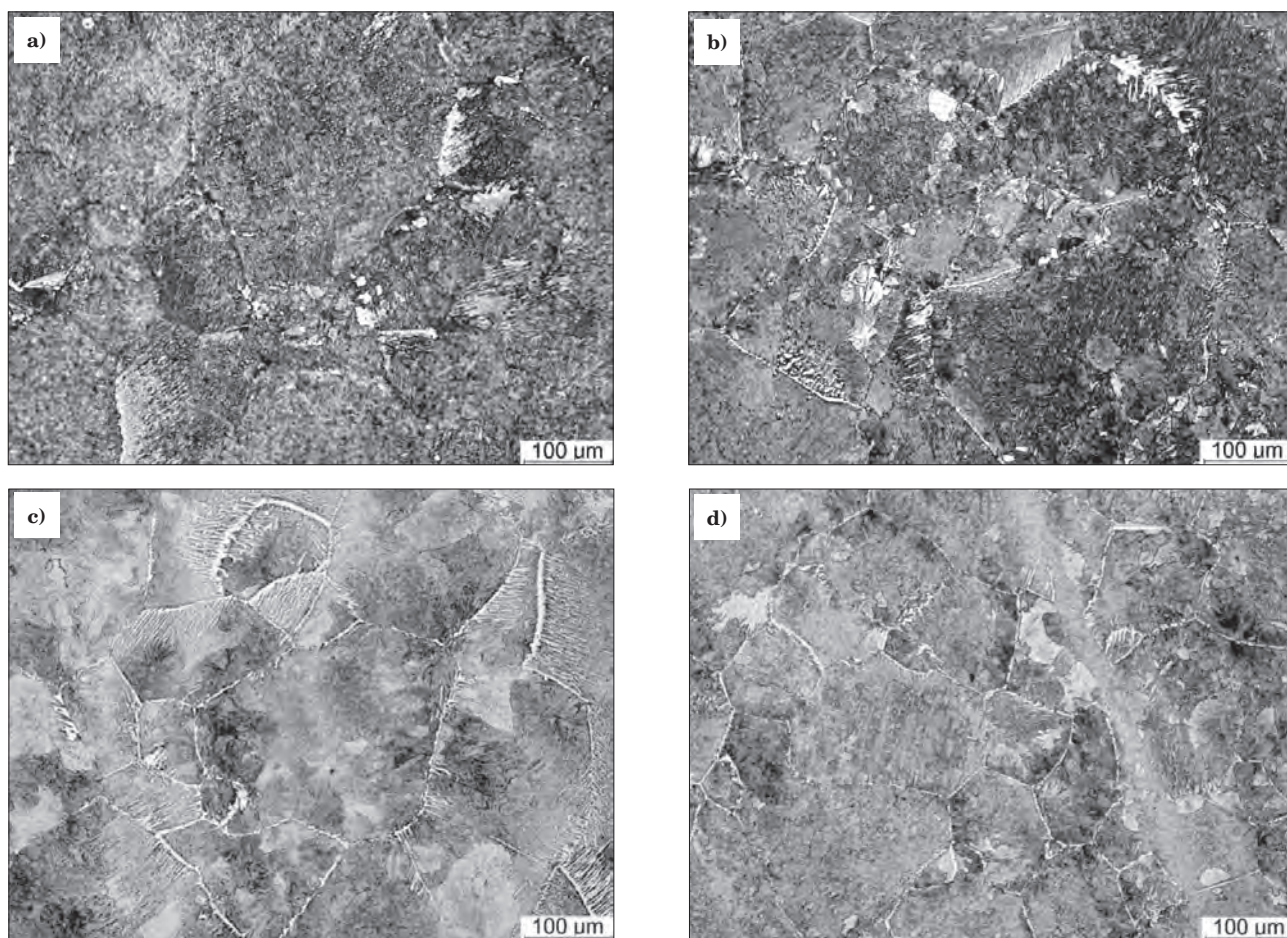
Przykładowe zdjęcia mikrostruktury półfabrykatu oraz odkuwki po kuciu w trzecim wykroju przedstawiono na rys. 10, a wyniki prowadzonej oceny ilościowej przedstawia rys. 11.

Na podstawie oceny ilościowej byłego austenitu na przekroju poprzecznym półfabrykatu stwierdzono, że wielkość ziaren byłego austenitu zmniejsza w kierunku od powierzchni półfabrykatu do osi symetrii (rys. 11a). Jest to zgodne z wynikami badań przemysłowych, a także symulacji numerycznej nagrzewania indukcyjnego, w której wykazano, że najwyższa gęstość generowanego ciepła oraz maksymalna temperatura materiału występuje w obszarze przypowierzchniowym półfabrykatu. Najmniejsze ziarna byłego austenitu w odkuwce występują w obszarach 4, 5, 6, a największe – w obszarze 1 i 3 (rys. 9b). Dane te są zgodne z wynikami symulacji numerycznej kucia, które wskazują, że w obszarach 1 i 3 wartości odkształcenia materiału są najmniejsze, a w obszarach 4, 5 oraz 6 – odpowiednio maksymalne oraz pośrednie.



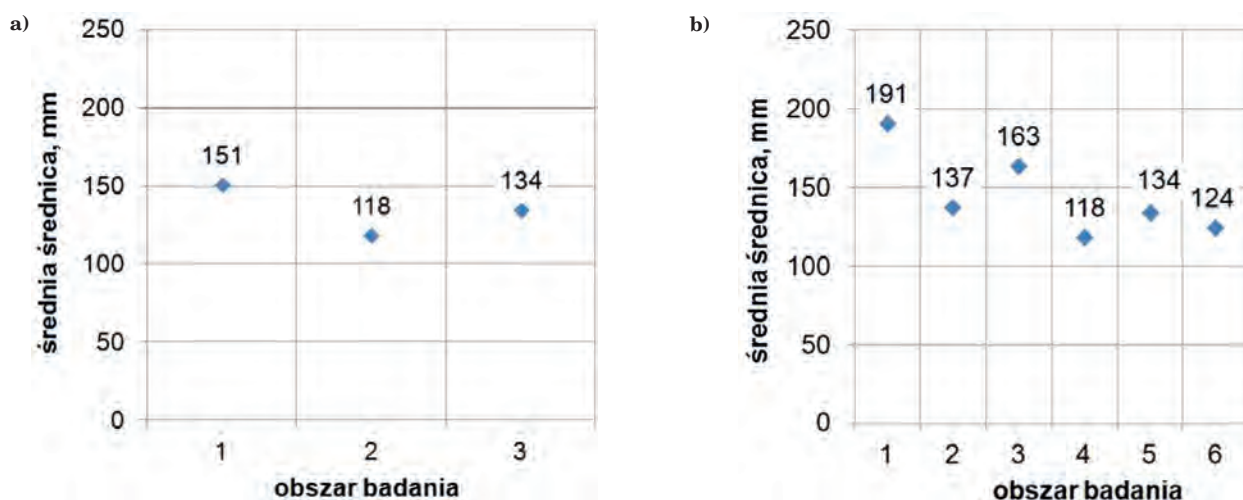
Rys. 9. Makrostruktura półfabrykatu N12 (a) oraz odkuwki K3 – po kuciu w trzecim wykroju (b) z zaznaczonymi obszarami badań mikrostruktury

Fig. 9. Macrostructure of N12 semi-finished product (a) and K3 forging – after forging process in the third pass (b) with indicated microstructure investigation areas



Rys. 10. Struktura ziaren byłego austenitu w stali C45: a) w obszarze 1 półfabrykatu N12; b) w obszarze 1 odkuwki K3; c) w obszarze 2 odkuwki K3; d) w obszarze 4 odkuwki K3

Fig. 10. Structure of former austenite grains in C45 steel: a) in area 1 of N12 semi-product; b) in area 1 of K3 forging; c) in area 2 of K3 forging; d) in area 4 of K3 forging



Rys. 11. Wielkość ziaren byłego austenitu w obszarach: a) półfabrykatu N12, b) odkuwki K3

Fig. 11. Size of former austenite grains in areas of: a) N12 semi-product, b) K3 forging

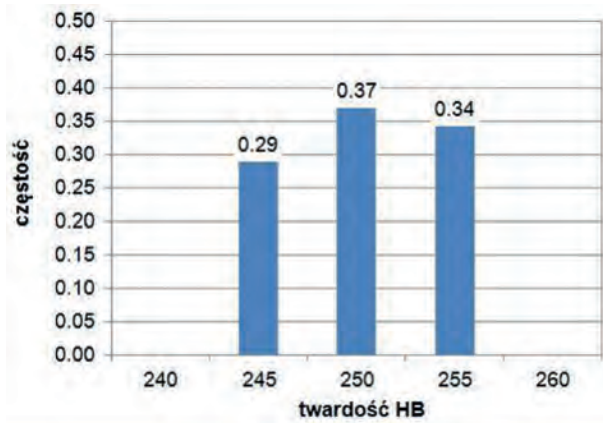
5. WDROŻENIE WYNIKÓW PROJEKTU

Kierując się wynikami przeprowadzonych badań, symulacji numerycznych, fizycznych oraz prób przemysłowych opracowano technologię kucia odkuwek złącza Cardana z nagrzewanych indukcyjnie półfabrykatów ze stali C45. Ustalono, że temperatura nagrzewania

powinna wynosić 1180-1250°C, czas nagrzewania półfabrykatu (o masie 9 kg) od temperatury otoczenia do założonej – 410-430 s, a przedziały czasowe między końcem grzania kolejnych półfabrykatów – 20-30 s.

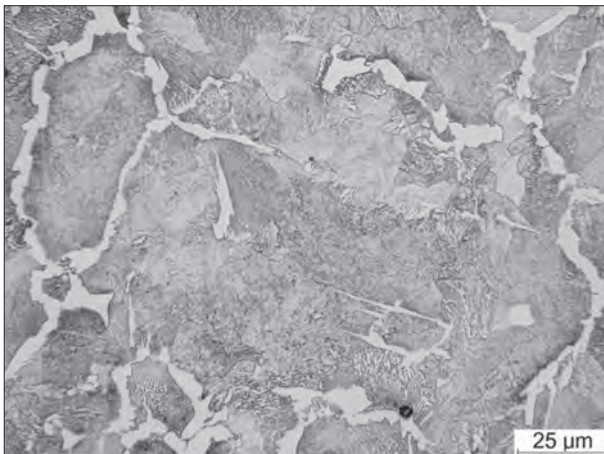
Odkuwki z indukcyjnie nagrzewanych półfabrykatów wykonane zgodnie z technologią kucia i chłodzenia stosowaną z firmie ForgeX spełniają następujące wyma-

gania dotyczące struktury oraz właściwości mechanicznych: struktura perlityczno-ferrytyczna, $R_e = 450\text{--}550$ MPa, $R_m = 790\text{--}850$ MPa, KCU = 62 J, HB = 220–270. Kryterium odbiorczym tych odkuwek w warunkach przemysłowych jest twardość HB. Rozkład częstości występowania twardości w serii próbnej, wykonanej z nagrzewanych indukcyjnie półfabrykatów, przedstawiono na rys. 12, a ich strukturę na rys. 13.



Rys. 12. Histogram twardości odkuwek wykonanych z półfabrykatów nagrzewanych indukcyjnie

Fig. 12. Hardness histogram for forgings made from induction heated semi-finished products



Rys. 13. Perlityczno-ferrytyczna mikrostruktura gotowej odkuwki ze stali C45

Fig. 13 Pearlitic-ferritic microstructure of finished C45 steel forging

Średnia twardość odkuwek próbnej ze stali C45 wynosi 248 HB. Wśród wykonanych 111 sztuk przeważają

odkuwki o twardości z zakresu 245÷250 HB. Minimalna twardość odkuwki wynosi 241 HB, a maksymalna 252 HB. W odkuwkach występuje struktura perlityczno-ferrytyczna, a ziarna ferrytu nie tworzą ciągłej siatki wokół kolonii perlitu, co jest zjawiskiem pozytywnym.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań przeprowadzonych w projekcie celowym, którego przedmiotem było opracowanie technologii indukcyjnego nagrzewania półfabrykatów do kucia odkuwek. Rezultaty przeprowadzonych prac pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Założony cel projektu został zrealizowany. Opracowano technologię kucia indukcyjnego nagrzewania półfabrykatów ze stali węglowo-manganowych przeznaczonych do kucia odkuwek dla przemysłu motoryzacyjnego.
2. Zastosowanie opracowanej technologii nagrzewania umożliwia wytwarzanie odkuwek spełniających wymagania wobec właściwości mechanicznych, które zostały określone przez potencjalnych odbiorców. Krótki czas nagrzewania indukcyjnego ogranicza rozrost ziarna austenitu.
3. Wdrożenie opracowanej technologii indukcyjnego nagrzewania półfabrykatów zapewni ograniczenie kosztów produkcji odkuwek dzięki zmniejszeniu nakładów energetycznych związanych z nagrzewaniem do temperatury kucia oraz skróci długość cyklu realizowanego procesu produkcyjnego.
4. W ramach projektu opracowano modele opisujące przemiany fazowe oraz rozwój mikrostruktury stali nagrzewanych indukcyjnie, które mogą być stosowane do symulacji procesu nagrzewania indukcyjnego i kucia odkuwek ze stali węglowo-manganowych oraz mikrostropowych. Weryfikację wszystkich symulacji numerycznych przeprowadzono wykorzystując dane uzyskane w badaniach przemysłowych. Dodatkowym efektem tych prac było jest poszerzenie bazy danych o informacje dotyczące brzegowych i początkowych warunków procesów nagrzewania indukcyjnego półfabrykatów oraz kucia odkuwek.

W artykule podsumowano wyniki badań zrealizowanych w ramach projektu celowego 6 ZR7 2007 C/07004 dofinansowanego ze środków NCBiR, zakończonego w czerwcu bieżącego roku.

LITERATURA

1. Sajdak C., Samek E.: Nagrzewanie indukcyjne. Podstawy teoretyczne i zastosowanie, Wyd. Śląsk, Katowice, 1985
2. Bernowsky G.: Induction erwärmung / VeB VERLAG TECHNIK BERLIN, 1980, 276
3. Von B. Nacke, Muhlbauser A.: Numerische Simulation des induktiven Erwärmungsvorganges in Stangenerwärmungsanlagen // Elektrowarme International 46 (1988) B2, s. 93-101
4. Kuziak R., Wroźyna A., Pidvysots'kyy V., Zalecki W., Łapczyński Z.: Opracowanie charakterystyk materiałowych do symulacji numerycznej procesu kucia za pomocą doświadczeń z wykorzystaniem symulatora Gleeble 3800, cz. I, PC-0120-02, 2009 (praca niepublikowana)
5. Kuziak R., Wroźyna A., Pidvysots'kyy V., Zalecki W., Łapczyński Z.: Opracowanie modelu zmian struktury i przemian fazowych stali przeznaczonych do kucia, cz. I, PC-0120-04, 2009 (praca niepublikowana)
6. Kuziak R., Wroźyna A., Pidvysots'kyy V., Zalecki W., Łapczyński Z.: Opracowanie modelu zmian struktury i przemian fazowych stali przeznaczonych do kucia, cz. II, PC-0120-04, 2010 (praca niepublikowana)