

Andrzej WROŻYNA, Roman KUZIĄK

Instytut Metalurgii Żelaza

OPRACOWANIE TECHNOLOGII PRODUKCJI ODKUWEK DLA PRZEMYSŁU MOTORYZACYJNEGO ZE STALI WĘGLOWYCH I ŚREDNIOSTOPOWYCH Z ZASTOSOWANIEM REGULOWANEJ OBRÓBK CIEPLNO-PLASTYCZNEJ I PRZYSPIESZONEGO- KONTROLOWANEGO CHŁODZENIA PO KUCIU

W pracy zaprezentowano wyniki badań związanych z opracowaniem technologii produkcji odkuwek z pominięciem dodatkowych zabiegów obróbki cieplnej. W opracowanej technologii zastosowano nagrzewanie materiału do kucia i przyspieszone-kontrolowane chłodzenie odkuwek bezpośrednio po procesie kształtowania. W ramach badań określono charakterystyki materiałowe stali węglowo-manganowej i stali z mikrodotatkami tytanu i wanadu. Przeprowadzono symulacje numeryczne i fizyczne kucia oraz przyspieszonego chłodzenia. Weryfikację opracowanej technologii przeprowadzono w warunkach przemysłowych.

Słowa kluczowe: stale średniowęglowe, stale mikrostopowe, przyspieszone chłodzenie kontrolowane, symulacja numeryczna, symulacja fizyczna

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING OF CARBON AND MEDIUM-ALLOY STEEL FORGINGS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY USING CONTROLLED THERMOPLASTIC TREATMENT AND ACCELERATED-CONTROLLED COOLING AFTER FORGING

This paper presents the results of research on development of technology for manufacturing of forgings without additional heat treatments. In this technology, the heating of material to be forged and accelerated-controlled cooling of forgings immediately after forming are used. As a part of the research, the material characteristics of carbon and manganese steel as well as steel with micro-additives of titanium and vanadium were determined. Numerical and physical simulations of forging and accelerated cooling were performed. The developed technology was verified under the industrial conditions.

Key words: medium-carbon steels, microalloyed steels, accelerated-controlled cooling, numerical simulation, physical simulation

1. WPROWADZENIE

Krajowy przemysł kuźniczy stosuje głównie tradycyjne technologie wytwarzania odkuwek matrycowych, obejmujące nagrzewanie wsadu, kucie matrycowe i dodatkową obróbkę cieplną. Tylko nieliczne zakłady opanowały produkcję odkuwek dla przemysłu motoryzacyjnego z nowoczesnych stali mikrostopowych metodą regulowanego kucia w połączeniu z przyspieszonym chłodzeniem. Tymczasem zastosowanie tej technologii daje szereg wymiernych korzyści, do których przede wszystkim należy zaliczyć [1–3]:

- wyeliminowanie obróbki cieplnej oraz zabiegu prostowania odkuwek;
- wyeliminowanie zniekształceń i pęknięć hartowniczych;
- poprawa skrawalności;
- zmniejszenie ilości operacji technologicznych;

- niższe koszty stali z mikrodotatkami w porównaniu do konwencjonalnych stali stopowych;
- obniżenie kosztów składowania i transportu.

Najważniejszą zasadą produkcji odkuwek metodą regulowanego kucia w połączeniu z przyspieszonym chłodzeniem jest ukształtowanie drobnoziarnistej struktury ferrytyczno-perlitycznej wyrobu oraz uzyskanie maksymalnego efektu umocnienia wydzieleniowego [2–6]. Mikrodotatkiem stopowym, który najczęściej wykorzystuje się do tego celu jest wanad, zaś do kontroli rozwoju mikrostruktury podczas obróbki cieplno-plastycznej, dodatkowo stosowany jest tytan. Stabilne, drobne cząstki azotku tytanu TiN hamują rozrost ziarna austenitu oraz spowalniają kinetykę rekrytalizacji statycznej i wzrostu ziarna po rekrytalizacji. Dzięki temu, możliwe jest uzyskanie drobnoziarnistej mikrostruktury austenitu w procesie kucia. Bardzo ważnym składnikiem stali z mikrodotatkami stopowymi jest

azot. Wzrost siły napędowej procesów wydzieleniowych, związany z podwyższaniem zawartości azotu w stali do wartości około 150-200 ppm, powoduje wzrost granicy plastyczności na skutek umocnienia wydzieleniowego węglikoazotkami wanadu V(C,N). Jednak, aby nie spowodować nadmiernego wzrostu wielkości cząstek TiN, konieczne jest stosowanie podstechiometrycznej zawartości tytanu w stosunku do zawartości azotu [4, 7].

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących opracowania technologii produkcji odkuwek dla przemysłu samochodowego ze stali węglowo-manganowej oraz stali z mikrododatki stopowymi (V i V+Ti), które zrealizowano w ramach projektu celowego. Technologia ta umożliwia uzyskanie odkuwek o pożądanych właściwościach mechanicznych z pominięciem dodatkowych zabiegów obróbki cieplnej – z zastosowaniem jednego nagrzewania do kucia i przyspieszonego chłodzenia bezpośrednio po procesie kształtowania. Redukuje to koszty związane z nakładami energetycznymi, a także skraca czas cyklu produkcyjnego w porównaniu do tradycyjnej technologii obejmującej kucie i obróbkę cieplną.

W pracy określono charakterystyki materiałowe stali węglowo-manganowej i stali z mikrododatki Ti i V. W oparciu o badania symulacyjne zaprojektowano oprzyrządowanie pozwalające przeprowadzić przemysłowe próby kucia oraz zweryfikować parametry procesu. Weryfikację technologii przeprowadzono w warunkach przemysłowych, realizując przyspieszone chłodzenie w zakupionym przez firmę ForgeX urządzeniu

BY („Behadlung auf bestimmte Streckgrenze, Yield-Strength” – obróbka w celu uzyskania ustalonej granicy plastyczności), w którym zastosowany jest system wentylatorów o regulowanej intensywności chłodzenia.

2. MATERIAŁ DO BADAŃ I METODYKA BADAWCZA

Badania dotyczące kucia oraz przyspieszonego chłodzenia odkuwek przeprowadzono dla standardowo stosowanej stali C45 oraz stali z dwóch wytopów laboratoryjnych o składach chemicznych zmodyfikowanych w stosunku do składu stali C45. W pierwszym z wytopów mikrododatkiem był wanad (C45+V), w drugim zastosowano mikrododatki wanadu i tytanu (C45+V,Ti). Skład chemiczny stali C45 oraz wytopów C45+V i C45+V,Ti przedstawiono w tablicach 1 i 2. Oprócz obecności mikrododatki wanadu i tytanu, różnice w składach chemicznych stali C45 i wytopów laboratoryjnych, polegały na zwiększonej do najwyższej dopuszczalnej dla gatunku C45 zawartości manganu i siarki oraz na braku chromu, molibdenu i niklu. Modyfikacji składu chemicznego dokonano w celu umożliwienia kontroli zmian strukturalnych oraz uzyskania właściwości mechanicznych typowych dla stali mikrostopowych. Geometrię analizowanej odkuwki złącza Cardana przedstawiono na rys. 1.

Tablica 1. Skład chemiczny analizowanej stali C45, % mas.

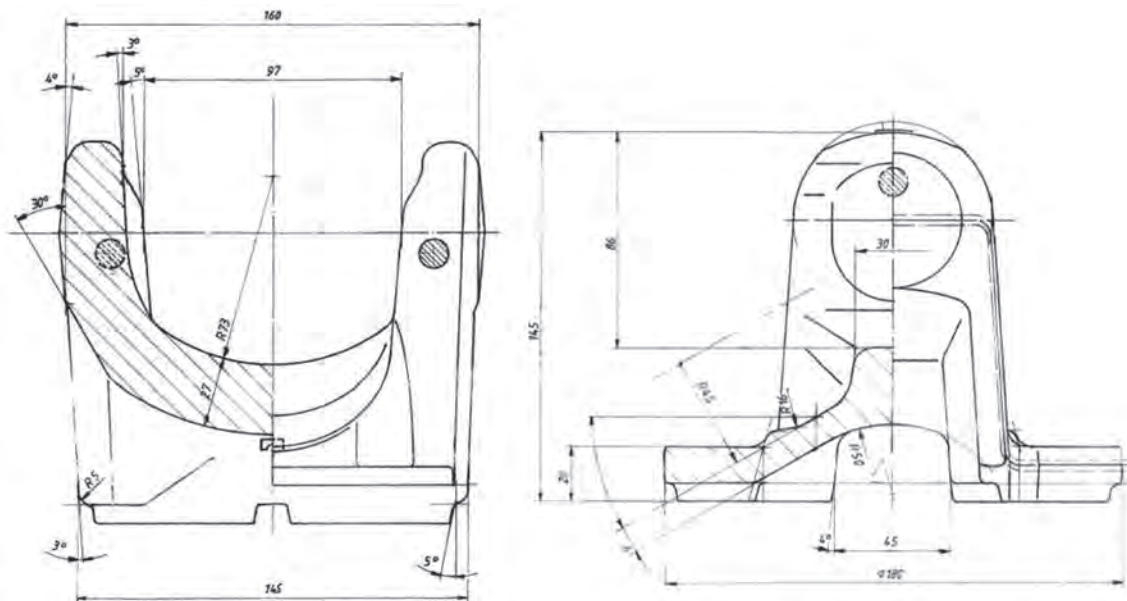
Table 1. Chemical composition of tested C45 steel, wt %

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. Skład chemiczny wytopów laboratoryjnych stali z mikrododatki V i Ti, % mas.

Table 2. Chemical composition of laboratory heats of steel with micro-additives of V and Ti, wt %

Gatunek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	V	Ti
C45+V	0,44	0,37	0,79	0,010	0,032	–	–	–	0,040	0,15	–
C45+V,Ti	0,46	0,39	0,76	0,008	0,040	–	–	–	0,038	0,17	0,011



Rys. 1. Odkuwka elementu złącza Cardana

Fig. 1. Forging of Cardan shaft component

W symulacjach fizycznych kucia i przyspieszonego chłodzenia zastosowano symulator procesów metalurgicznych Gleeble 3800. W oparciu o uzyskane dane opracowano model rozwoju mikrostruktury badanych materiałów. Symulacje numeryczne prowadzono przy użyciu programu FORGE. Warunki charakteryzujące proces i dane materiałowe określono na podstawie prób przemysłowych oraz symulacji fizycznej kucia.

Próby przemysłowe wykonano nie tylko po to, aby określić początkowe i brzegowe warunki symulacji numerycznych, ale także w celu weryfikacji opracowanej technologii kucia i przyspieszonego chłodzenia. Za pomocą termopar wyznaczono zmiany temperatury w czasie dla wybranych obszarów półfabrykatów i odkuwek. Powierzchniowy rozkład pola temperatury określono za pomocą pomiarów kamerą termowizyjną FLIR SC 660. Ocenę ilościową mikrostruktury badanych materiałów przeprowadzono z zastosowaniem technik mikroskopii świetlnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej.

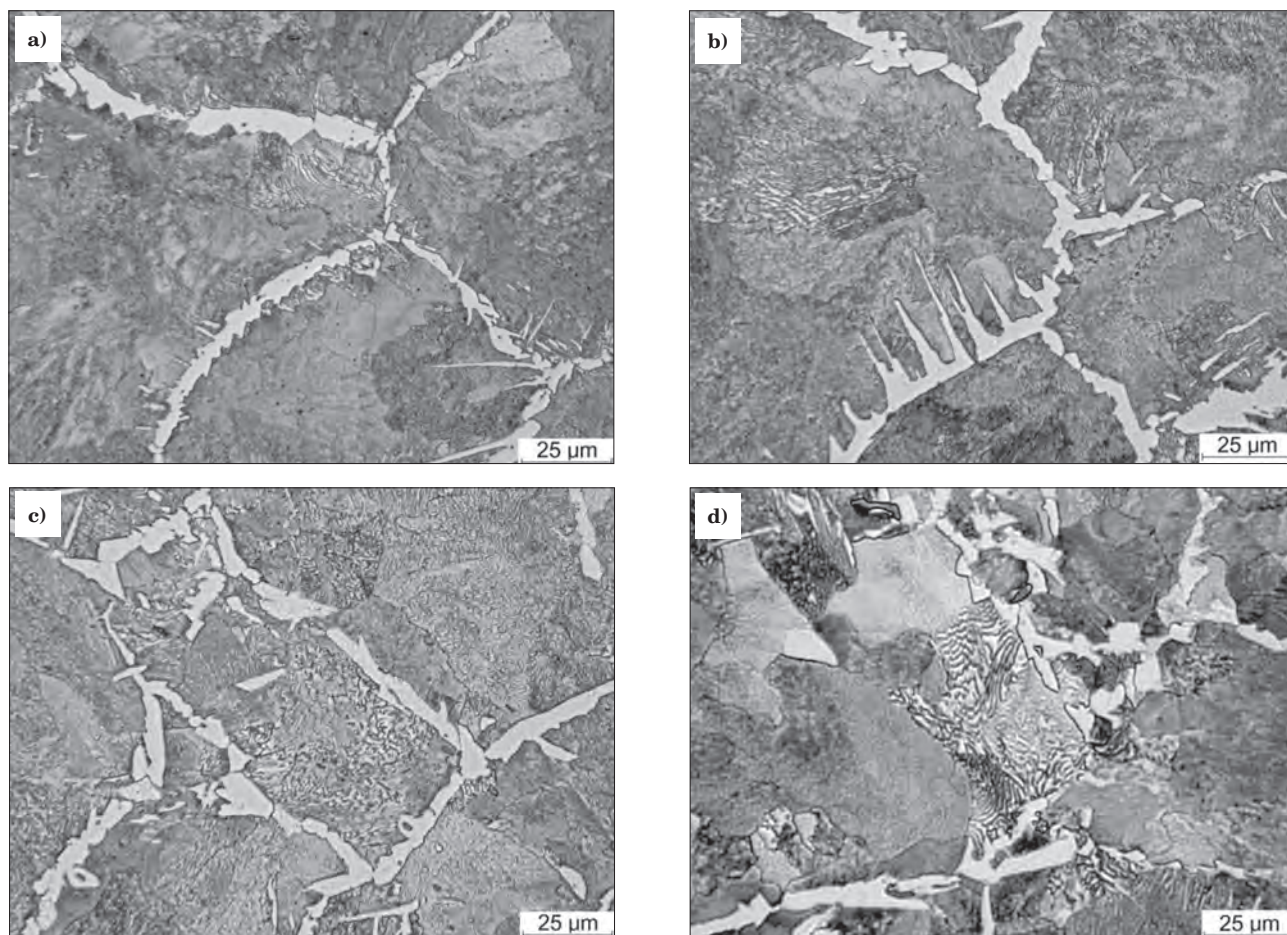
3. SYMULACJE FIZYCZNE

W ramach symulacji fizycznych procesu kucia określono wpływ parametrów nagrzewania półfabrykatów, odkształcania oraz warunków chłodzenia na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne badanych stali.

Symulacje przeprowadzono dla próbek osiowosymetrycznych, oraz dla próbek umożliwiających wykonanie badań właściwości mechanicznych (próbki typu Plain-Strain). Sekwencję odkształceń ($\epsilon_1 = 0,35$, $\epsilon_2 = 0,45$, $\epsilon_3 = 0,25$) – odpowiadających odkształceniom w kolejnych etapach kucia – realizowano w założonej temperaturze odkształcania w odstępach 10-sekundowych. Temperaturę odkształcania T_d zróżnicowano między eksperymentami, przyjmując wartości: 1260, 1200 i 1100°C. Chłodzenie składało się z trzech etapów odwzorowujących: chłodzenie w spokojnym powietrzu (szybkość chłodzenia $1,3 \pm 0,3^\circ\text{C/s}$) od temperatury odkształcania do temperatury początku przyspieszonego chłodzenia T_{chl} (w artykule przedstawiono wyniki dla eksperymentów, w których $T_{chl} = 920^\circ\text{C}$), przyspieszone chłodzenie do temperatury 300°C z szybkością C_r wynoszącą 2°C/s lub 5°C/s oraz swobodne stygnięcie do temperatury otoczenia.

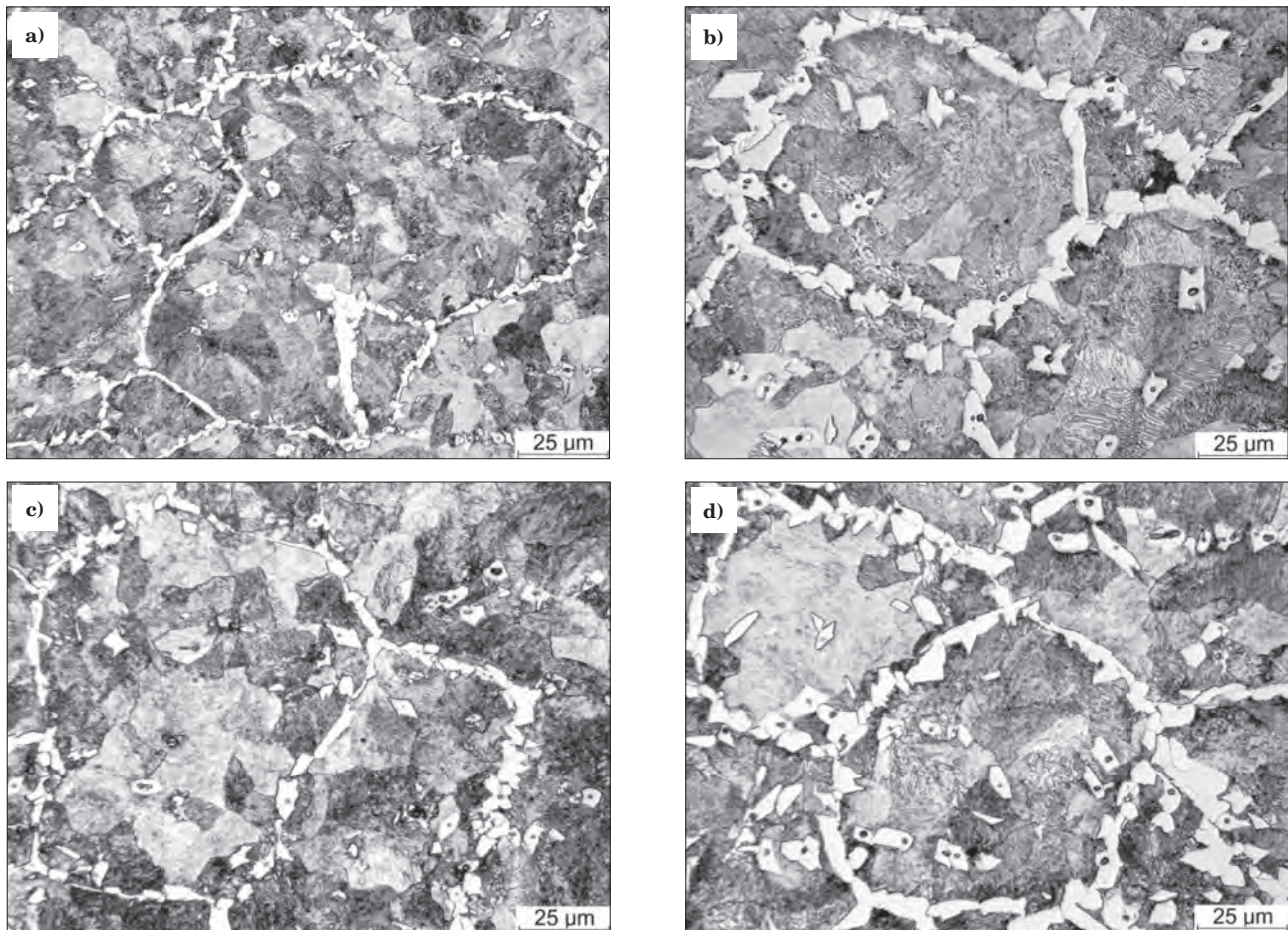
Wyniki badań strukturalnych próbek ze stali C45, C45+V i C45+V,Ti – uzyskanych z symulacji fizycznej procesu kucia – zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 2–4. Natomiast wybrane wyniki oceny ilościowej struktury i badań właściwości mechanicznych przedstawiono na rysunku 5.

We wszystkich wariantach obróbki stali C45 oraz C45 z mikrodotatkami dominuje struktura perlitu z siatką ferrytu (rys. 2–4). Średni udział perlitu w stali C45



Rys. 2. Mikrostruktura próbek ze stali C45 po symulacji fizycznej kucia z przyspieszonym chłodzeniem od temperatury 920°C: a) temperatura kucia $T_d = 1260^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 5°C/s ; b) $T_d = 1260^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 2°C/s ; c) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 2°C/s ; d) $T_d = 1100^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 2°C/s

Fig. 2. Microstructure of C45 steel samples after physical simulation of forging process with accelerated cooling from 920°C: a) forging temperature $T_d = 1260^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 5°C/s ; b) $T_d = 1260^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 2°C/s ; c) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 2°C/s ; d) $T_d = 1100^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 2°C/s



Rys. 3. Mikrostruktura próbek ze stali C45+V po symulacji fizycznej kucia z przyspieszonym chłodzeniem od temperatury 920°C: a) temperatura kucia $T_d = 1260^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 5°C/s; b) $T_d = 1260^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 2°C/s; c) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 5°C/s; d) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 2°C/s

Fig. 3 Microstructure of C45+V steel samples after physical simulation of forging process with accelerated cooling from 920°C: a) forging temperature $T_d = 1260^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 5°C/s; b) $T_d = 1260^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 2°C/s; c) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 5°C/s; d) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 2°C/s

wynosi około 70%, w stali C45+V wynosi około 87%, a w stali C45+V,Ti – około 80% (rys. 5a, c, e). Wzrost udziału ferrytu wynika między innymi z obecności ferrytu idiomorficznego wewnątrz ziarn byłego austenitu – niezwiązanego z siatką ferrytu allotriomorficznego (rys. 3, 4). Powstawanie ziarn ferrytu idiomorficznego jest konsekwencją stosunkowo dużej zawartości manganu i siarki w wytopach laboratoryjnych – potwierdzają to często obserwowane wewnątrz ferrytu siarczki manganu, które są centrami jego zarodkowania. Średnia cięciwa ziarna byłego austenitu w stalach C45, C45+V oraz C45+V,Ti wynosi odpowiednio około: 105, 45 oraz 30 μm . Zmniejszenie wielkości ziarna byłego austenitu w wytopach laboratoryjnych jest spowodowane wprowadzeniem do stopów mikrododatków wanadu i tytanu. Najmniejsza średnia wielkość byłego ziarna austenitu występuje w odkuwkach z wytopu C45+V,Ti, co wskazuje na szczególną efektywność stosowania dodatku tytanu. Wzrost właściwości wytrzymałościowych przeciętnie o około 200 MPa w próbkach z wytopów C45+V oraz C45+V,Ti, w porównaniu do próbek ze stali C45, spowodowany jest umocnieniem wydzieleniami węglikoazotka wanadu V(C,N).

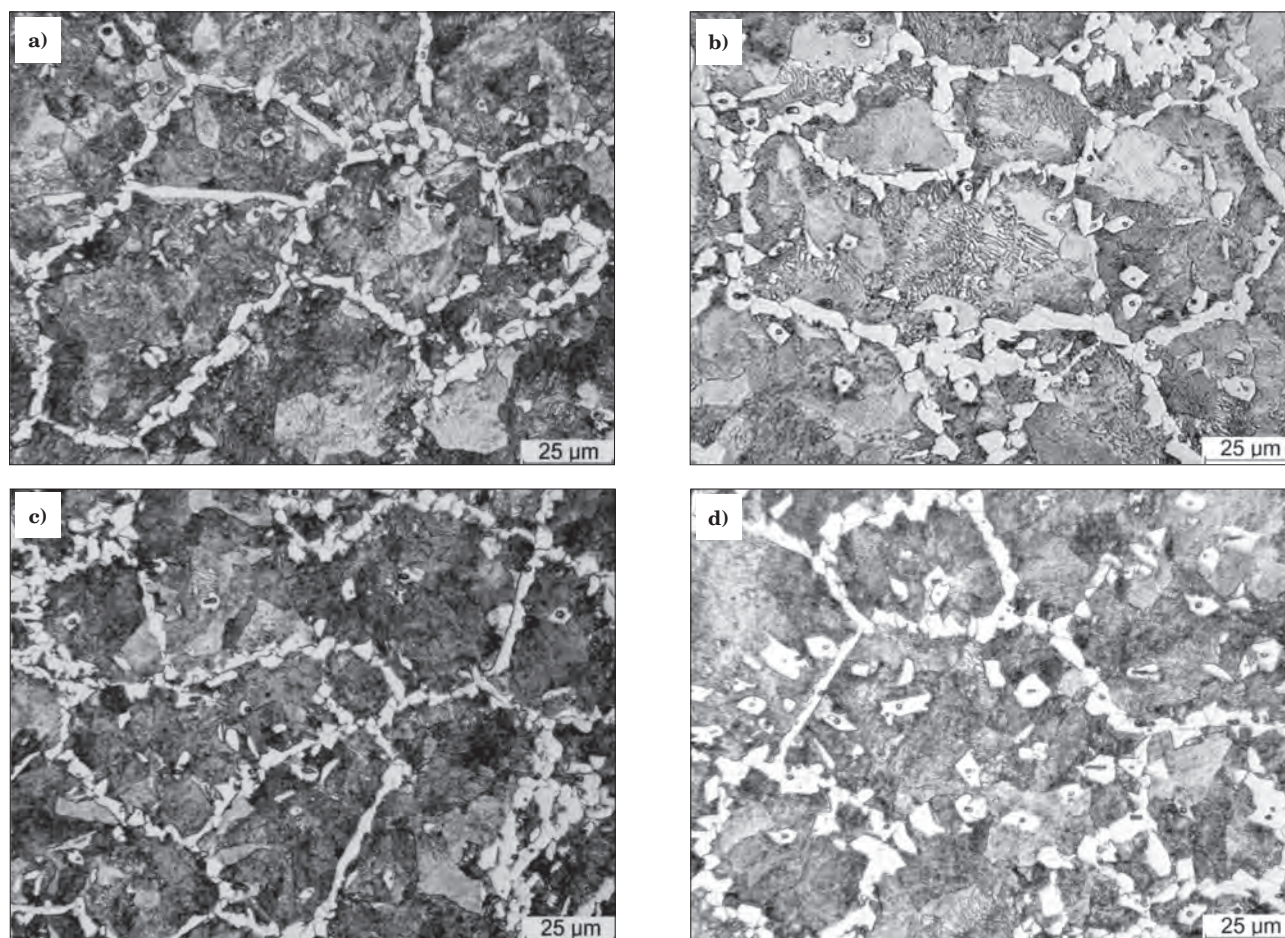
Z porównania struktury i właściwości próbek uzyskanych dla różnych wartości temperatury odkształcania i szybkości chłodzenia wynika, że niższa temperatura

odkształcania i wyższa szybkość chłodzenia powoduje zmniejszenie ziarna austenitu. Analizując wpływ tych parametrów na twardość i właściwości wytrzymałościowych stwierdzono, że wzrost szybkości chłodzenia powoduje podwyższenie granicy plastyczności, wytrzymałości oraz nieznaczny wzrost twardości badanych stali (rys. 5b, d, f). Natomiast nie stwierdzono istotnego wpływu temperatury odkształcania stali C45, C45+V oraz C45+V,Ti na twardość i właściwości wytrzymałościowe. Zatem w celu uzyskania wysokiego poziomu analizowanych właściwości mechanicznych odkuwek w procesie kucia i chłodzenia tych stali najważniejsze będzie zapewnienie dużej szybkości chłodzenia po kuciu.

4. SYMULACJE NUMERYCZNE

Symulacje numeryczne regulowanej obróbki cieplno-plastycznej i przyspieszonego chłodzenia po kuciu przeprowadzono w celu analizy wpływu temperatury nagrzewania i kucia, jak i warunków przyspieszonego chłodzenia na stan mikrostruktury oraz właściwości mechaniczne odkuwek.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem programu FORGE 2D/3D. Warunki począt-



Rys. 4. Mikrostruktura próbek ze stali C45+V,Ti po symulacji fizycznej kucia z przyspieszonym chłodzeniem od temperatury 920°C: a) temperatura kucia $T_d = 1260^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 5°C/s; b) $T_d = 1260^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 2°C/s; c) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 5°C/s; d) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, przyspieszone chłodzenie: 2°C/s

Fig. 4 Microstructure of C45+V,Ti steel samples after physical simulation of forging with accelerated cooling from 920°C: a) forging temperature $T_d = 1260^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 5°C/s; b) $T_d = 1260^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 2°C/s; c) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 5°C/s; d) $T_d = 1200^\circ\text{C}$, accelerated cooling: 2°C/s

kowe i brzegowe określono na podstawie wyników symulacji fizycznej oraz doświadczeń przemysłowych. W pierwszym etapie symulacji numerycznej modelowano proces kucia odkuwki w trzech wykrojach (rys. 6). Uzyskane dane dotyczące rozkładu temperatury, odkształcenia, prędkości odkształcania i rozkładu naprężenia uplastyczniającego w odkuwce po kuciu w ostatnim wykroju, wykorzystano jako dane wejściowe do drugiego etapu – symulacji procesu przyspieszonego chłodzenia.

Półfabrykat przeznaczony do kucia miał rozmiary zgodne ze stosowanym w warunkach przemysłowych: długość 145 mm i przekrój kwadratowy o boku 95 mm z zaokrąglonymi narożnikami (promień zaokrąglenia wynosił około 15 mm). Maksymalna temperatura materiału półfabrykatu przed kuciem wynosiła 1250°. Na podstawie pomiarów doświadczalnych przyjęto niejed-

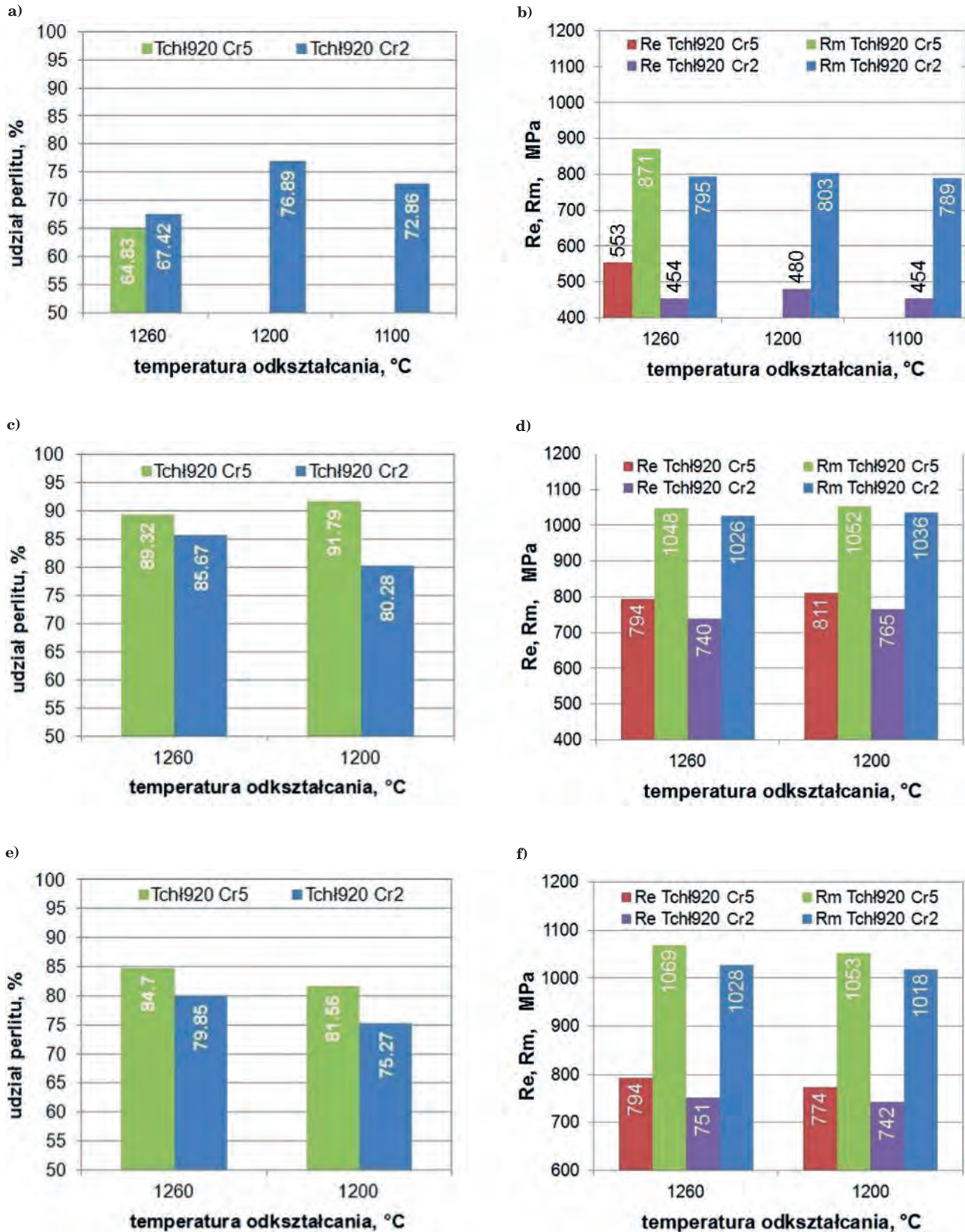
norodny rozkład temperatury na długości półfabrykatu (rys. 7). Przedziały czasowe między kolejnymi odkształceniami oraz początkiem chłodzenia, a także wartości innych parametrów technologicznych przyjęto zgodnie z wynikami prób przemysłowych (tablica 3). Przyjęto, że górna matryca prasy przemieszcza się z prędkością 667 mm/s. Temperatury trzech zastosowanych wykroi (wkładki umieszczonej we wspólnej obudowie) wynosiły – zgodnie z wynikami prób przemysłowych – w dolnej obudowie odpowiednio: 170, 150, 130°C, natomiast w górnej obudowie odpowiednio: 100, 150, 100°C.

W symulacji numerycznej obróbki cieplno-plastycznej oraz przyspieszonego chłodzenia po kuciu wykorzystano opracowane modele przemian fazowych i przewidywania właściwości mechanicznych, a także wygenerowany w module TTTDatabase programu Forge model reologiczny (opisujący zmiany naprężeń i od-

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

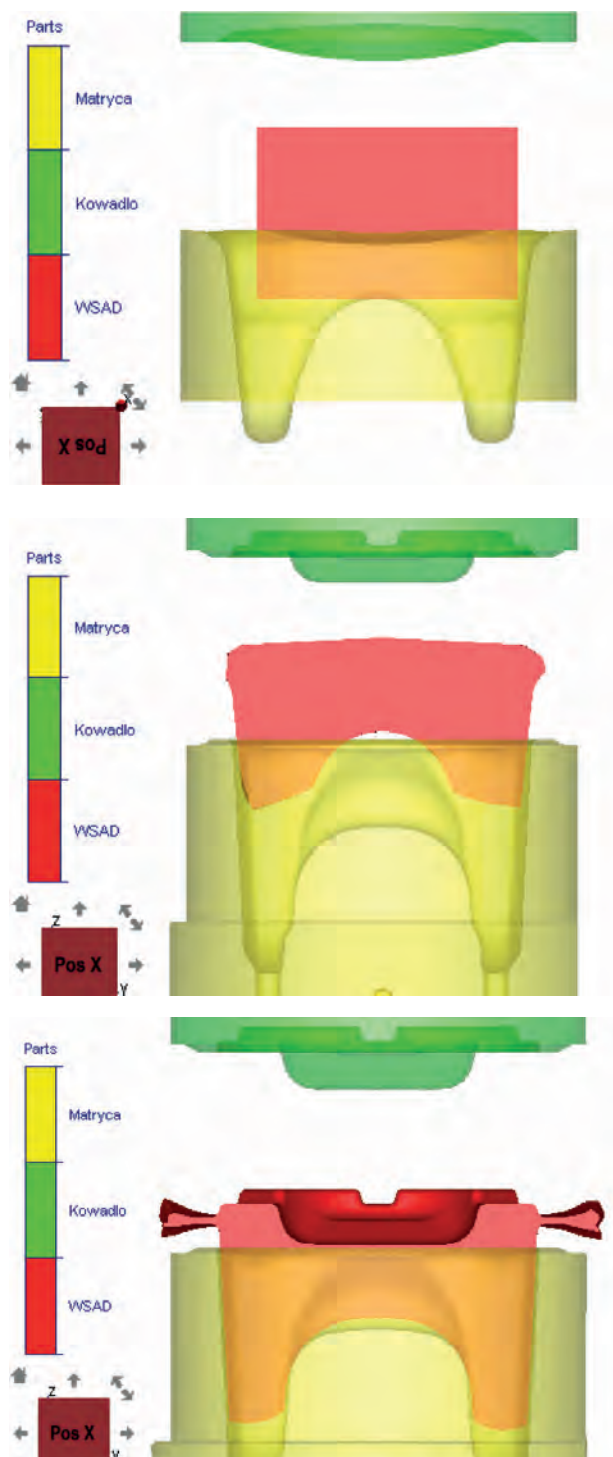
Table 3. Average time intervals between consecutive stages of the forging and cooling process

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. 5. Wpływ parametrów odkształcania (temperatury kucia T_d , temperatury początku przyspieszonego chłodzenia T_{chl} oraz szybkości przyspieszonego chłodzenia C_r) na udział perlitu i właściwości wytrzymałościowe: a, b) stali C45; c, d) stali C45+V; e, f) stali C45+V.Ti; (skrótowo zastosowane na rysunkach: Tch1920 – temperatura początku przyspieszonego chłodzenia wynosząca 920°C, C_r – szybkość przyspieszonego chłodzenia wynosząca odpowiedni 5 i 2°C/s, Re – wartość granicy plastyczności, Rm – wartość wytrzymałości na rozciąganie)

Fig. 5. Effect of strain parameters (forging temperature T_d , temperatures at the beginning of accelerated cooling T_{chl} and accelerated cooling rates C_r) on pearlite content and strength properties of: a, b) C45 steel; c, d) C45+V steel; e, f) C45+V.Ti steel; (abbreviations in the figures: Tch1920 – temperature at the beginning of accelerated cooling 920°C, C_r – accelerated cooling rate 5 and 2°C/s, respectively, Re – yield point, Rm – tensile strength)



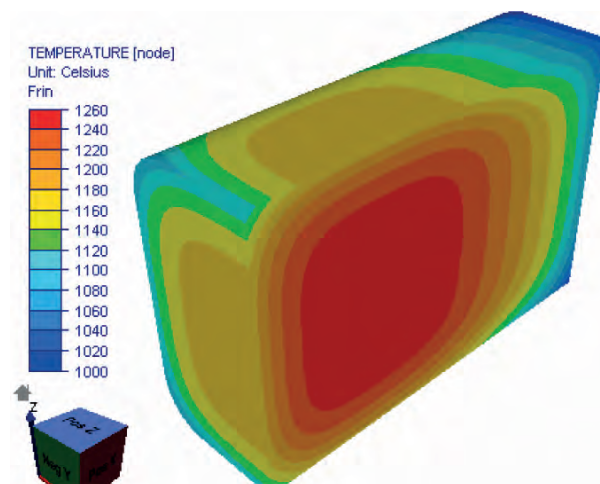
Rys. 6 Schemat odkształcenia odkuwki w trzech wykojach (wykonanych w formie wkładek umieszczonych we wspólnej obudowie)

Fig. 6. Diagram of forging deformation in three passes (in the form of inserts in shared casing)

kształceń wynikających z przemian fazowych). Do programu zaimplementowano także funkcje użytkownika (tablica 4) poszerzające standardowy zakres obliczeń numerycznych o dodatkowe parametry charakteryzujące strukturę oraz właściwości mechaniczne.

Przykładowe wyniki symulacji numerycznej przyspieszonego chłodzenia przedstawiono na rys. 8 i 9.

Z przeprowadzonych symulacji numerycznych kucia matrycowego oraz przyspieszonego chłodzenia wynika, że w odkuwce występuje struktura perlityczno-ferry-



Rys. 7. Rozkład temperatury w półfabrykacie przed symulacją pierwszego odkształcenia

Fig. 7. Temperature distribution in semi-finished product before the first strain simulation

tyczna. Wyniki symulacji sugerują, że niejednorodność rozkładu temperatury materiału przed rozpoczęciem kucia nie wpływa znacząco na zróżnicowanie udziałów objętościowych składników strukturalnych (udział perlitu $77 \div 85\%$), ale znajduje pewne odzwierciedlenie w zróżnicowaniu wielkości ziarna ferrytu, odległości między płytówkowej i wielkości kolonii perlitu, a poprzez to w zróżnicowaniu właściwości mechanicznych.

5. PRÓBY PRZEMYSŁOWE

5.1. PARAMETRY PROCESU TECHNOLOGICZNEGO

Przemysłowe próby kucia i przyspieszonego chłodzenia odkuwek przeprowadzono dla wsadu ze stali o zróżnicowanym składzie chemicznym – dla standardowo stosowanej stali C45 oraz pochodzących z wytopów laboratoryjnych stali o składzie chemicznym zbliżonym do C45 z mikrodotadkiem wanadu (C45+V) i z mikrodotadkiem wanadu i tytanu (C45+V,Ti). W pierwszej części prób przemysłowych celem było wyznaczenie wstępnych warunków kucia oraz przyspieszonego chłodzenia po kuciu odkuwek ze stali węglowo-manganowych oraz mikrostopowych, a w drugiej – wykonanie próbnej serii odkuwek, pozwalających zweryfikować opracowaną technologię.

Aby określić warunki początkowe i brzegowe procesu kucia odkuwek, a także zmiany temperatury materiału odkuwek, w kolejnych etapach kucia, okrawania i przyspieszonego chłodzenia przeprowadzono pomiary temperatury z zastosowaniem kamery termowizyjnej oraz termopar umieszczonych w półfabrykacie przeznaczonych do kucia oraz odkuwkach przeznaczonych do przyspieszonego chłodzenia. Przeprowadzono również pomiar odstępów czasowych między kolejnymi etapami kucia. Termogramy odkuwek przeznaczonych do badań materiałoznawczych wykonano w charakterystycznych momentach procesu produkcyjnego: po kolejnych etapach kucia, po okrawaniu oraz przed rozpoczęciem przyspieszonego chłodzenia (lub oziębiania w wodzie). Warunki początkowe i brzegowe przyspieszonego chłodzenia odkuwek określono w kanale chłodzącym linii

Tablica 4. Dodatkowe parametry opisu charakteryzujące strukturę oraz właściwości mechaniczne badanych odkuwek zastosowane w symulacjach numerycznych procesu wytwarzania

Table 4. Additional description parameters to characterise structure and mechanical properties of tested forgings used in numerical simulations of the manufacturing process

Równanie	Wyjaśnienie symboli
$D_{\alpha} = [7,05 - 8,37C - 1,63Mn + 8,5V - 20N]D_{\gamma}^{0,2}Cr_r^{-0,25}$ (1)	D_{α} – wielkość ziarna ferrytu, μm D_{γ} – wielkość ziarna austenitu, μm C_r – szybkość chłodzenia $^{\circ}\text{C/s}$
$S_0 = 0,13 + 1,027C - 1,93C^2 - 0,1107Mn + 0,0305Cr_r^{-0,05}$ (2)	S_0 – odległość międzyplątkowa, μm
$D_c = 5,0 - 49,8C + 214,2C^2 - 23,9Mn + 35,7Cr_r^{-0,05}$ (3)	D_c – wielkość kolonii perlitu, μm
$\sigma_e = F_{\alpha}[77,7 + 59,5Mn + 9,1D_{\alpha}^{-0,5}] + (1 - F_{\alpha})[145,52 + 3,5S_0^{-0,5}] + 75,4Si + 1200P + 478N^{0,5}$ (4)	σ_e – granica plastyczności, MPa F_{α} – udział ferrytu
$\sigma_m = F_{\alpha}[20 + 2440N^{0,5} + 18,5D_{\alpha}^{-0,5}] + 750(1 - F_{\alpha}) + (1 - F_{\alpha}^{0,5})3S_0^{-0,5} + 92P$ (5)	σ_m – wytrzymałość, MPa

BY (systemem wentylatorów o regulowanej intensywności chłodzenia). Chłodzenie realizowano w kilku wariantach przy zróżnicowanym nadmuchu wentylatorów oraz różnej szybkości posuwu odkuwek.

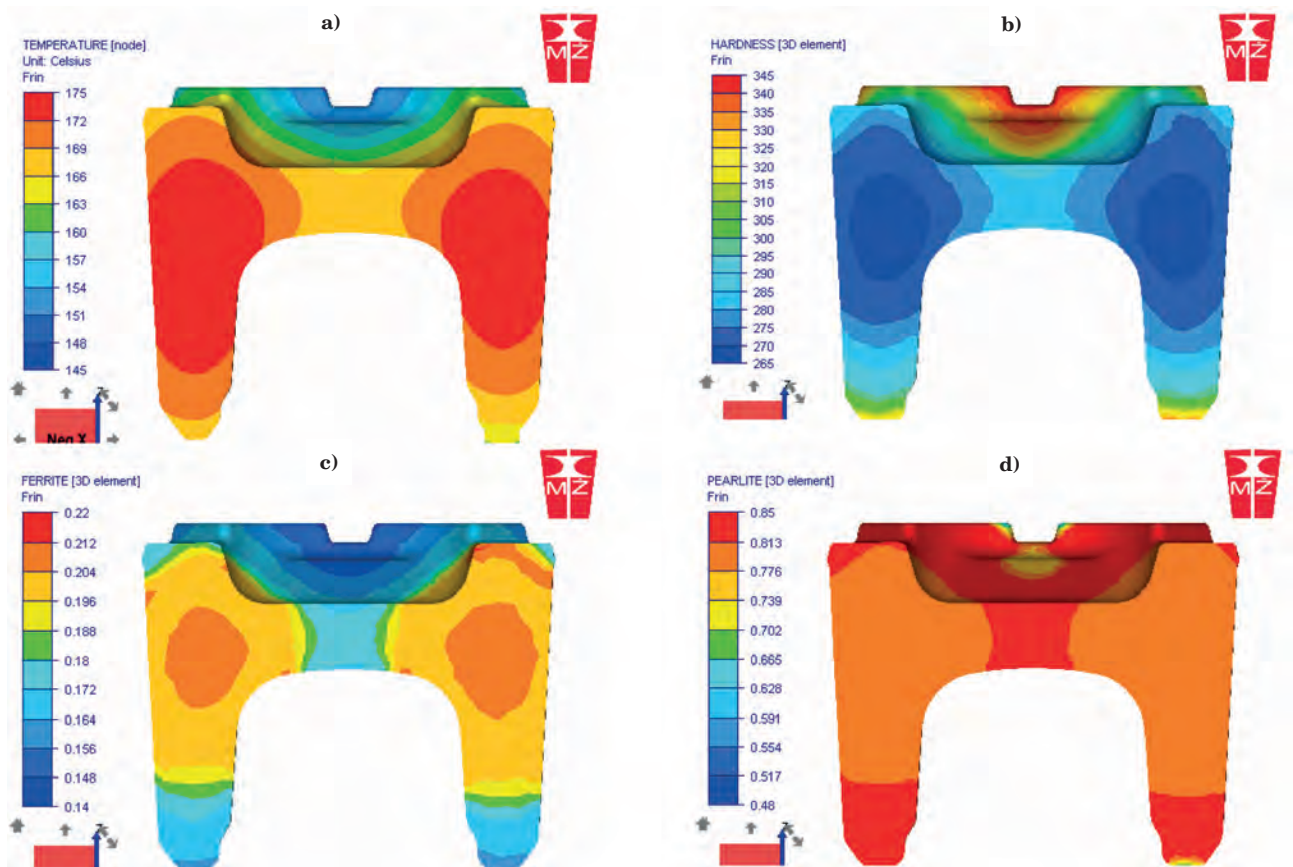
Przykładowe termogramy powierzchni półfabrykatu bezpośrednio przed kuciem oraz wykonanej z niego odkuwki w kolejnych etapach wytwarzania przedstawiono na rys. 10.

Zestawienie wartości maksymalnej temperatury na powierzchni odkuwek ze stali C45 oraz C45 z mikrodatkami wanadu i tytanu uzyskanych w czasie badań przemysłowych prezentuje tablica 5. Zróżnicowanie wartości temperatur odkuwek (szczególnie w końcowych etapach wytwarzania) wynika przede wszystkim z oddziaływania czynnika ludzkiego na przebieg pro-

cesu produkcyjnego (duży udział czynności manualnych).

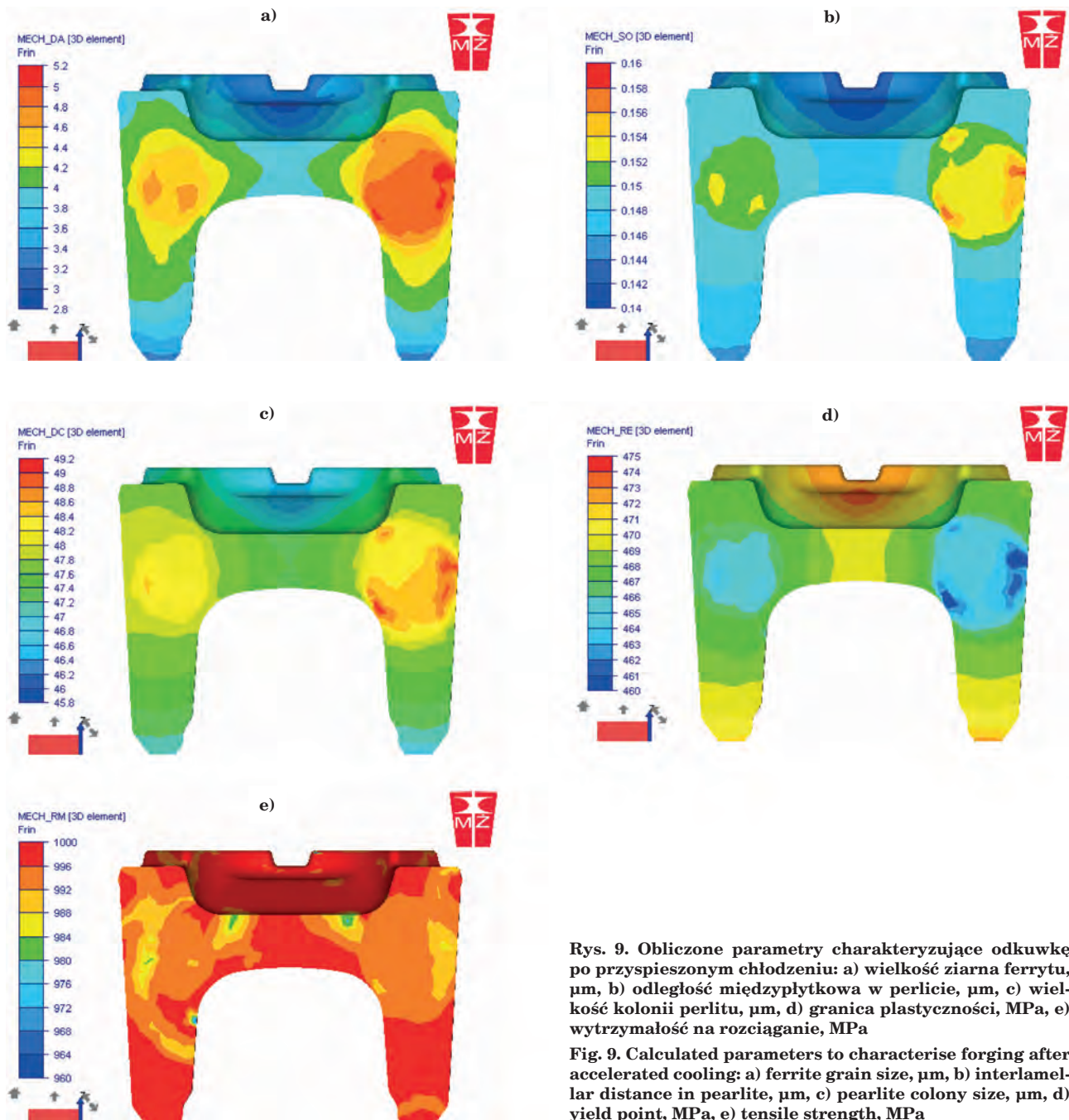
Wyniki pomiarów odstępów czasowych między kolejnymi etapami kucia, okrawania i przyspieszonego chłodzenia odkuwek przedstawiono w tablicy 6.

Przykładowy przebieg krzywych chłodzenia w kanale BY w wybranych obszarach odkuwek przedstawiono na rys. 11. Krzywe chłodzenia zarejestrowane przez termopary umieszczone na głębokości 16 i 20 mm sugerują, że intensywne chłodzenie odkuwek w kanale BY powoduje obniżenie temperatury przemiany perlitycznej do zakresu $650 \div 600^{\circ}\text{C}$. Im bliżej powierzchni odkuwki, tym większe opóźnienie przemiany perlitycznej. Efekt cieplny przemiany ujawnia się po około 2 minutach od rozpoczęcia chłodzenia, co wskazuje, że prawdopo-



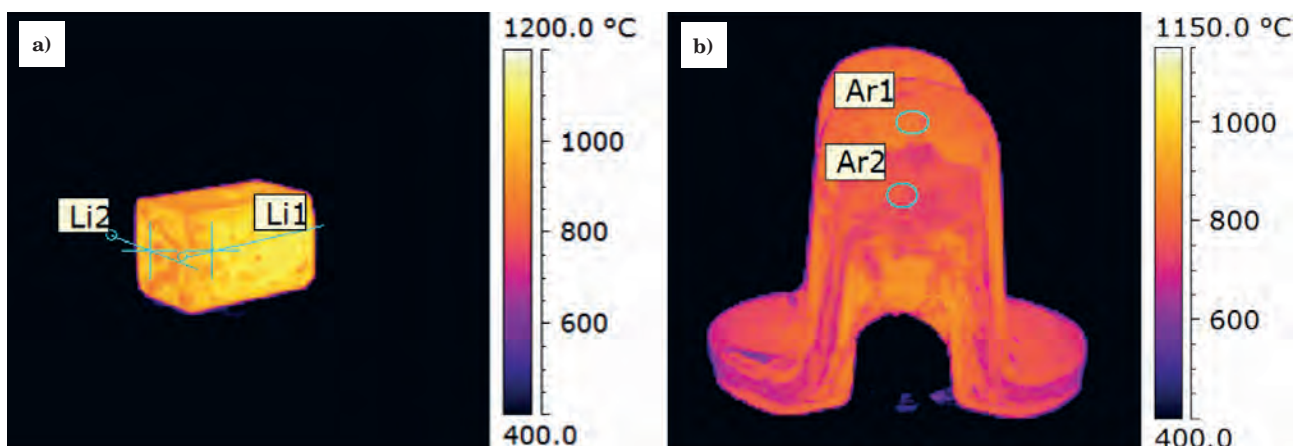
Rys. 8. Obliczone parametry charakteryzujące odkuwkę po przyspieszonym chłodzeniu: a) rozkład pola temperatury, $^{\circ}\text{C}$, b) twardość, HV, c) udział ferrytu, d) udział perlitu

Fig. 8. Calculated parameters to characterise forging after accelerated cooling: a) temperature field distribution, $^{\circ}\text{C}$, b) hardness, HV, c) ferrite content, d) pearlite content



Rys. 9. Obliczone parametry charakteryzujące odkuwkę po przyspieszonym chłodzeniu: a) wielkość ziarna ferrytu, μm , b) odległość międzyplątkowa w perlicie, μm , c) wielkość kolonii perlitu, μm , d) granica plastyczności, MPa, e) wytrzymałość na rozciąganie, MPa

Fig. 9. Calculated parameters to characterise forging after accelerated cooling: a) ferrite grain size, μm , b) interlamellar distance in pearlite, μm , c) pearlite colony size, μm , d) yield point, MPa, e) tensile strength, MPa



Rys. 10. Przykład rozkładu pól temperatury materiału odkuwki: a) przed kuciem; b) d) 30 s po okrawaniu

Fig. 10. Example of temperature field distribution in forging material: a) before forging process; b) d) 30 s after trimming

Tablica 5. Maksymalna temperatura na powierzchni odkuwek (zgodnie z przykładowymi oznaczeniami na rys. 10) ze stali C45 oraz C45 z mikrodotatkami

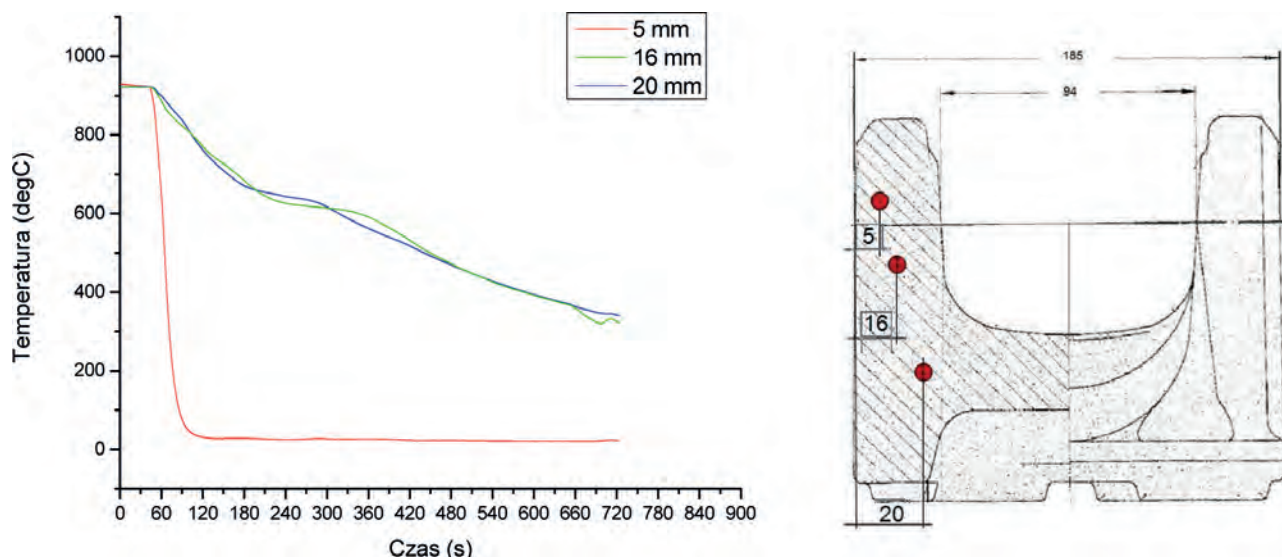
Table 5. Maximum surface temperature of forgings (according to the examples of marking in fig. 10) in steel C45 and C45 with micro-additives

Materiał odkuwki	Etap procesu wytwarzania			
	przed kuciem	po kuciu	przed okrawaniem	30 s po okrawaniu
C45	1100°C	1140°C	1050°C	931°C
C45+V	1152°C	1126°C	1046°C	844°C
C45+V,Ti	1167°C	1082°C	1065°C	987°C

Tablica 6. Średnie przedziały czasowe między kolejnymi etapami procesu technologicznego

Table 6. Average time intervals between consecutive stages of the manufacturing 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 (oraz Okrawanie) – Przyspieszone chłodzenie	10 s



Rys. 11. Krzywe chłodzenia odkuwki w wariacie chłodzenia (3 wentylatory + sprężone powietrze, prędkość posuwu 0,5 m/min) (a) oraz lokalizacja obszarów pomiaru temperatury (b)

Fig. 11. Cooling curves for forging in the cooling variant (3 fans + compressed air, feeding rate 0.5 m/min) (a) and location of temperature measurement areas (b)

dobnie także większość ferrytu w odkuwkach powstaje już w czasie przyspieszonego chłodzenia. Zatem duże znaczenie dla kształtowania mikrostruktury odkuwek mają warunki chłodzenia w kanale BY.

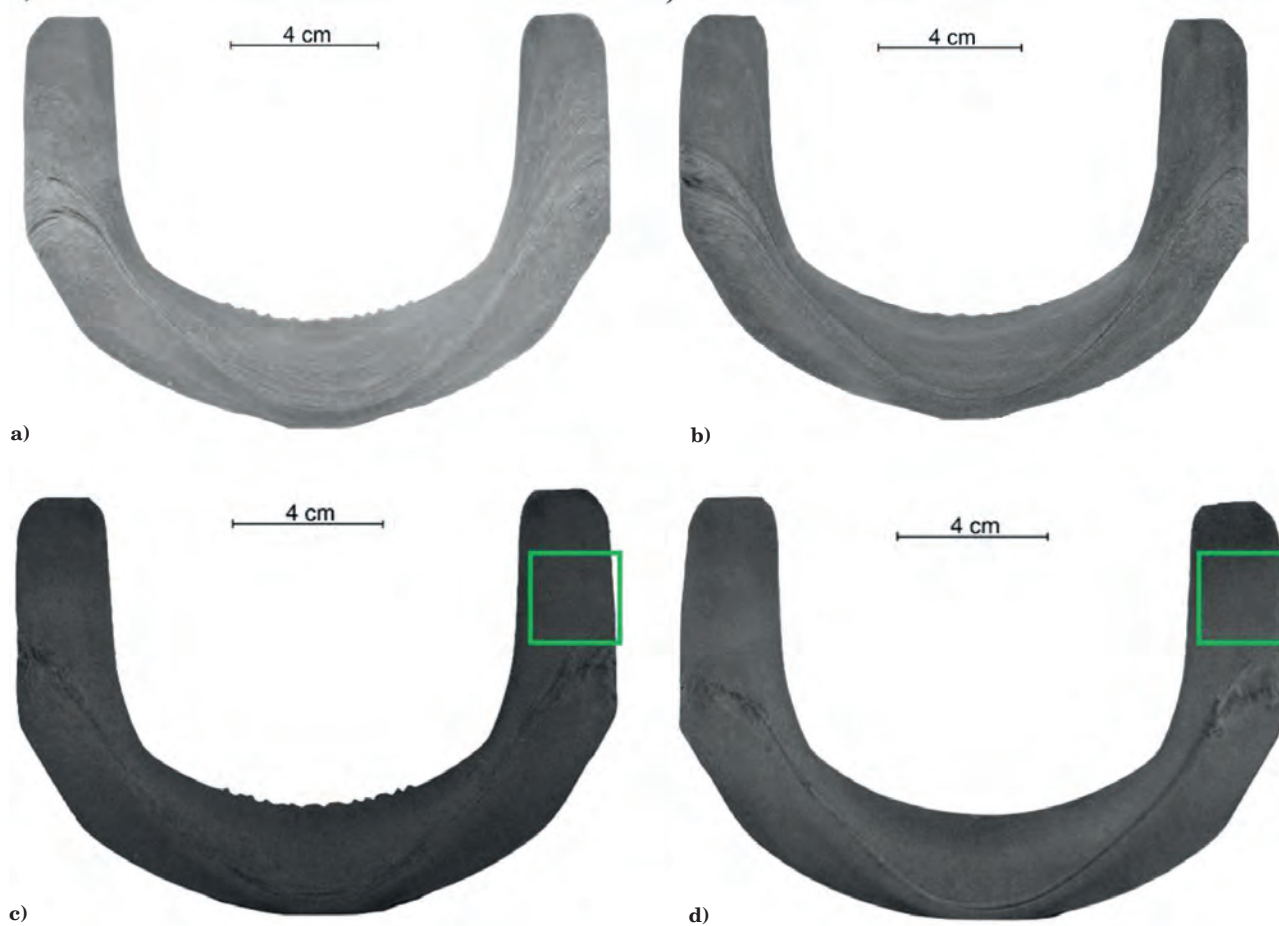
Z pomiarów temperatury wynika, że temperatura powierzchni materiału w czasie kucia utrzymuje się w przedziale 1100÷1150°C i maleje przed rozpoczęciem chłodzenia do około 900°C. Zatem można założyć, że odkształcenie odbywa się w stałej temperaturze. Zarejestrowane krzywe chłodzenia odkuwek w kanale BY wykorzystano do określenia szybkości chłodzenia materiału dla różnych wariantów pracy wentylatorów oraz szybkości posuwu odkuwek w kanale BY. Dane z prób przemysłowych wykorzystano do celów realizacji symulacji fizycznych i numerycznych procesu kucia i przyspieszonego chłodzenia odkuwek.

5.2. BADANIA MATERIAŁOZNAWCZE ODKUWEK Z PRÓB PRZEMYSŁOWYCH

Odkuwki, które wytworzono w próbach przemysłowych, poddano badaniom strukturalnym oraz bada-

niom właściwości mechanicznych. Przeprowadzono badania makrostruktury, ocenę wielkości ziarna byłego austenitu w stanie po okrojeniu z wypłytki (schłodzonych wodą) oraz mikrostruktury po kontrolowanym-przyspieszonym chłodzeniu w kanale linii BY. Określono właściwości wytrzymałościowe (R_e , R_m), plastyczne (ze względu na geometrię odkuwek – A_2 , Z) oraz zbadano twardość HV10 odkuwek. Przedstawione na rys. 12 miejsce realizacji badań zaprezentowanych w niniejszej pracy jest tożsame z obszarem realizacji badań odbiorczych odkuwek w warunkach przemysłowych.

Wyniki badań makrostruktury odkuwek C45, C45+V oraz C45+V,Ti przedstawiono na rys. 13. We wszystkich odkuwkach występuje poosiowy układ włókien. Na obrazach makrostruktury widoczny jest charakterystyczny przebieg włókien materiału w pobliżu osi półfabrykatów wykorzystanych podczas kucia, który związany jest ze zmianą udziału ferrytu zarodkującego na wtrąceniach niemetalicznych częściej występujących w centralnej części półfabrykatów niż w obszarze przypowierzchniowym. Jednak wtrącenia niemetalicz-



Rys. 12. Makrostruktura odkuwek ze stali C45 (a i b), stali C45+V (c) oraz C45+V,Ti (d) z zaznaczonymi obszarami realizacji prezentowanych badań mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych

Fig. 12. Macrostructure of C45 (a and b), C45+V (c) and C45+V,Ti (d) steel forgings with marked areas where the presented investigations of microstructure and mechanical properties were carried out

ne nie są widoczne gołym okiem, a ich średnia wielkość nie przekracza wymagań określonych normą PN-H-04510. Badania metodą głębokiego trawienia (według normy PN-H-04501) nie wykazały obecności pęcherzy, płatków i pęknięć wewnętrznych.

Strukturę ziaren byłego austenitu (odkuwek chłodzonych w wodzie) oraz strukturę perlityczno-ferrytyczną odkuwek ze stali C45, C45+V i C45+V,Ti chłodzonych w kanale chłodzącym linii BY przedstawiono na rys. 13.

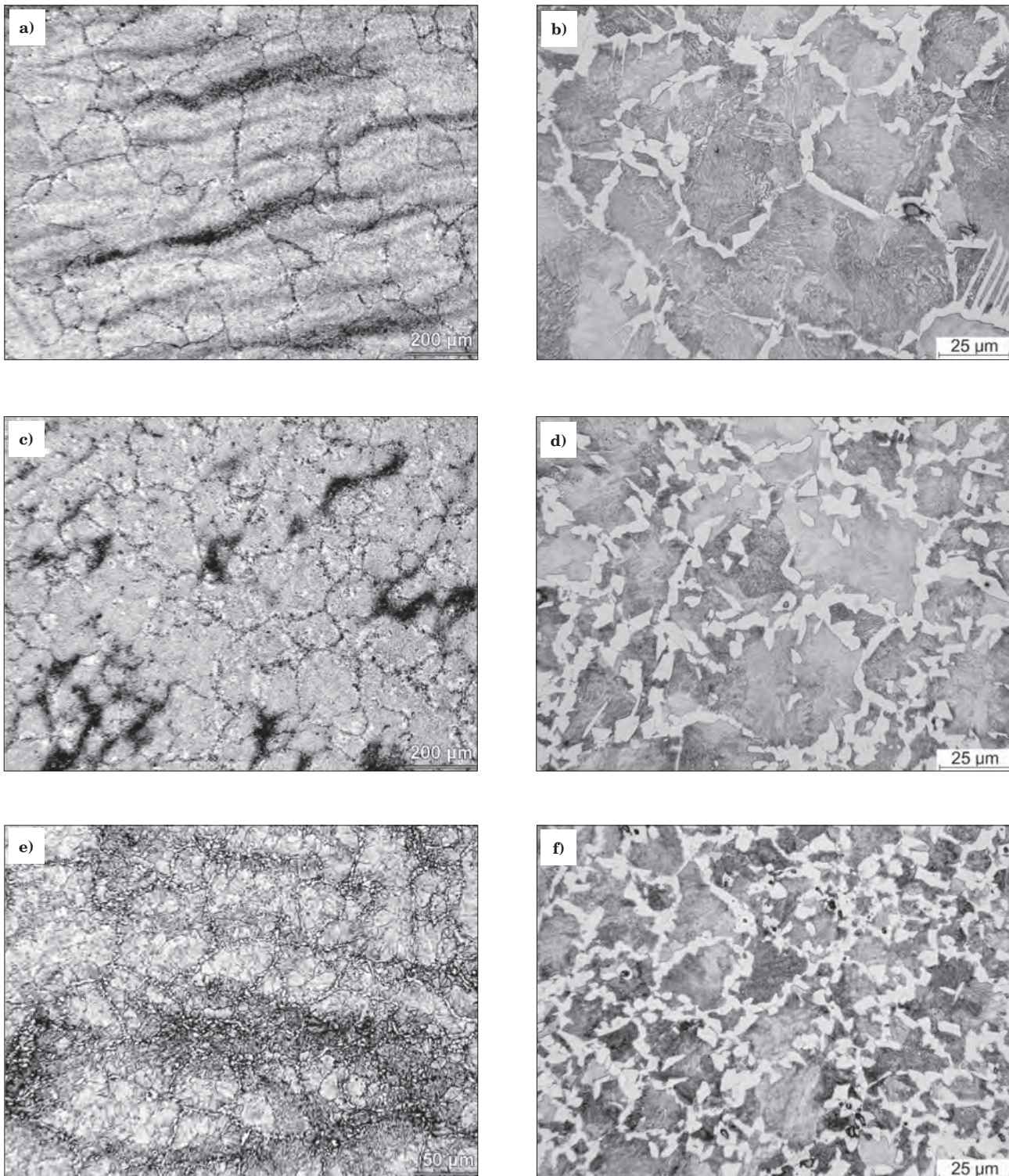
Wyniki oceny ilościowej składników strukturalnych odkuwek (udział objętościowy oraz wybrane parametry opisujące ziarno byłego austenitu, perlit i ferryt) przedstawiono na rys. 14. Wyniki badań właściwości mechanicznych zaprezentowano na rys. 15.

Ocena ilościowa potwierdziła znaczący wpływ dodatku tytanu na zmniejszenie wielkości ziarna byłego austenitu w odkuwkach ze stali C45+V,Ti (Rys. 14a). Wielkość byłego ziarna austenitu dla odkuwek ze stali C45+V nie różni się istotnie od tej w odkuwkach ze stali C45. Natomiast w odkuwkach z obu wytopów laboratoryjnych udział ferrytu jest większy o ponad 10% niż w odkuwkach ze stali C45. Ziarna ferrytu są bardziej równoosiowe i w mniejszym stopniu tworzą ciągłą siatkę wokół kolonii perlitu (rys. 13). Modyfikacja składu chemicznego wytopów laboratoryjnych spowodowała także zmniejszenie wielkości ziarna ferrytu oraz ko-

lonii perlitu (rys. 14c, d). Natomiast średnia odległość międzypłytkowa w perlicie – zależna głównie od szybkości chłodzenia – w odkuwkach z wytopów laboratoryjnych zmniejszyła się tylko nieznacznie w porównaniu do odkuwek ze stali C45. Zmiany strukturalne wywołane modyfikacją składu chemicznego znajdują swoje odzwierciedlenie w wartościach parametrów wytrzymałościowych – w odkuwkach ze stali C45+V oraz C45+V,Ti są one wyższe o około 200 MPa niż w odkuwkach ze stali C45. Wyniki badań odkuwek są zbliżone z wynikami przeprowadzonych symulacji fizycznych i numerycznych.

6. WDROŻENIE WYNIKÓW PROJEKTU

Kierując się wynikami przeprowadzonych badań, symulacji fizycznych i numerycznych oraz prób przemysłowych opracowano technologię kucia i przyspieszonego kontrolowanego chłodzenia odkuwek złącza Cardana ze stali C45 oraz stali C45 z mikrododatkami wanadu oraz wanadu i tytanu w rozważanym kanale chłodzącym BY. Ustalono, że początkowa temperatura schładzania odkuwek powinna wynosić 880–900°C, a prędkość przesuwu schładzanej odkuwki: 0,8–1,0 m/min. Odkuwki chłodzone w takich warunkach spełniają następujące wymagania dotyczące właściwości me-

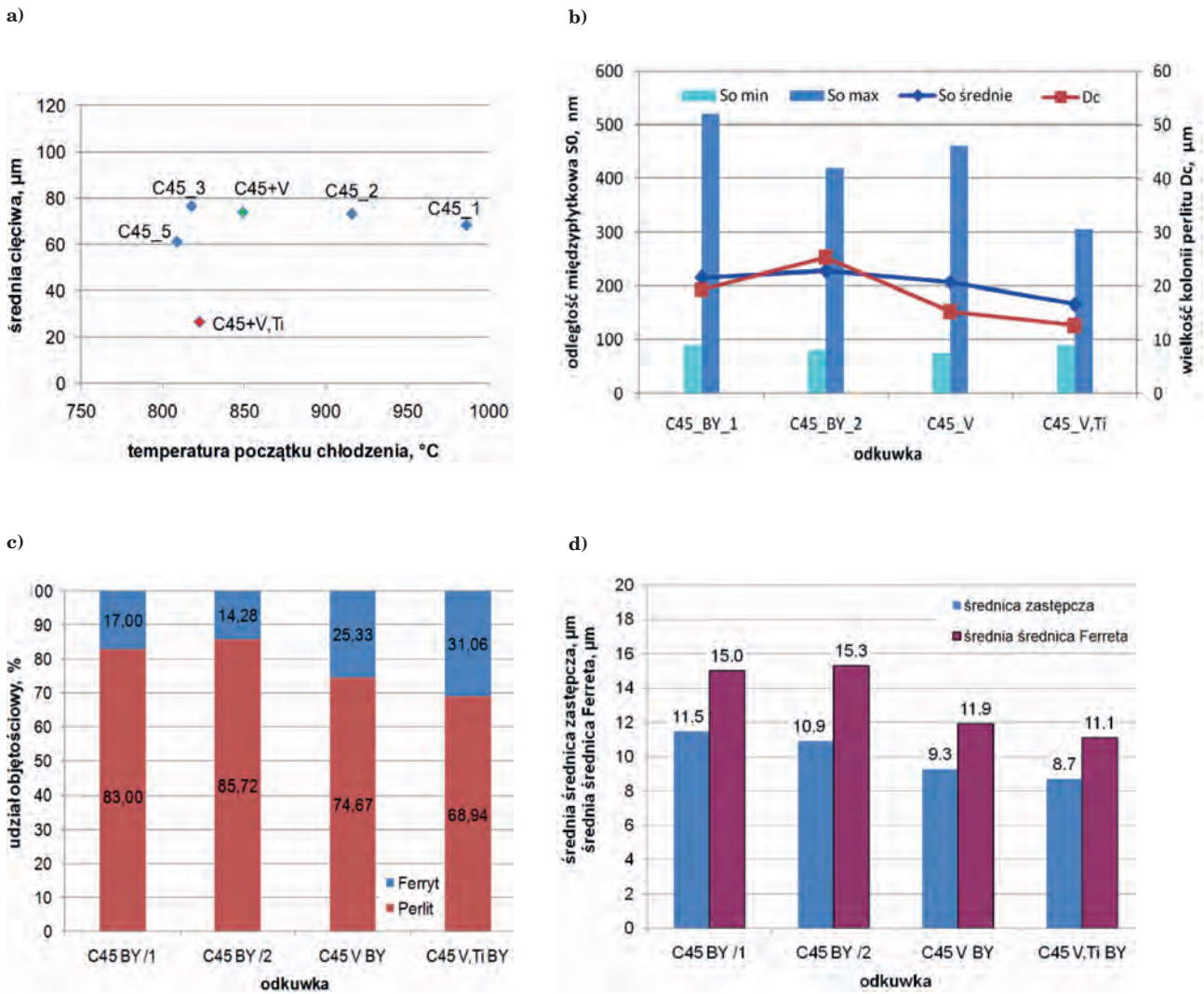


Rys. 13. Struktura ziaren byłego austenitu (w obszarze wskazanym na rys.12) po chłodzeniu w wodzie odkuwek ze stali C45 (a), C45+V (c) oraz C45+V,Ti (e), a także mikrostruktura perlityczno-ferrytyczna chłodzonych w kanale chłodzącym BY odkuwek ze stali C45 (b), C45+V (d) oraz C45+V,Ti (f)

Fig. 13. Structure of former austenite grains (in the area marked in fig. 12) after water cooling of C45 (a), C45+V (b) and C45+V,Ti (c) steel forgings as well as pearlitic-ferritic microstructure of C45 (b), C45+V (d) and C45+V,Ti (f) steel forgings cooled in BY cooling channel

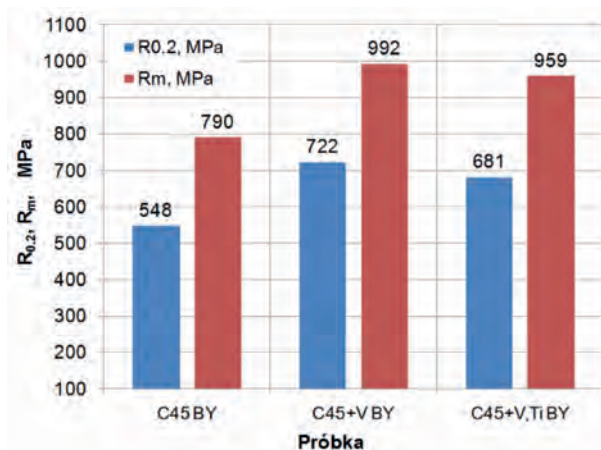
chanicznych: $R_e = 450\text{--}550$ MPa, $R_m = 790\text{--}850$ MPa, $KCU = 62$ J, $HB = 220\text{--}270$. Kryterium odbiorczym analizowanych odkuwek w warunkach przemysłowych jest twardość HB. Rozkład twardości próbnej serii odkuwek, które wykonano zgodnie z opracowaną technologią, przedstawiono na rys. 16.

Średnia twardość odkuwek próbnej ze stali C45 wynosi 249 HB. Wśród wykonanych 172 egzemplarzy dominują odkuwki o twardości z zakresu 245÷255 HB, które stanowią około 90% wszystkich odkuwek. Minimalna twardość odkuwki wynosiła 241 HB, a maksymalna 263 HB.



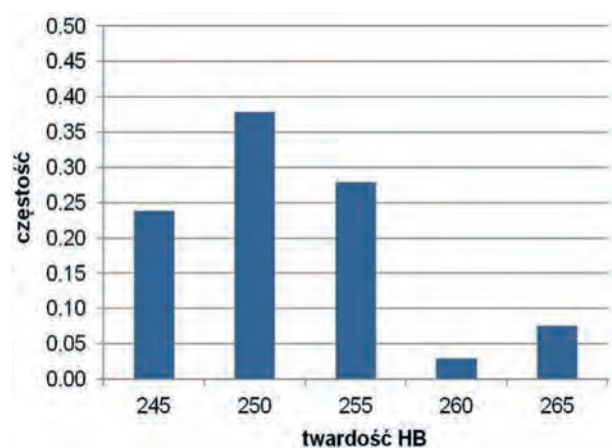
Rys. 14 Charakterystyka strukturalna odkuwek ze stali C45 (dwie odkuwki), C45+V oraz C45+V,Ti chłodzonych w kanale chłodzącym linii BY: a) wielkość ziarna byłego austenitu, b) odległość międzyplątkowa w perlicie oraz wielkość kolonii perlitu w odkuwkach chłodzonych na linii BY, c) udział objętościowy składników strukturalnych, d) wielkość ziarna ferrytu

Fig. 14. Structural characteristics of C45 (two forgings), C45+V and C45+V,Ti steel forgings cooled in BY line cooling channel: a) former austenite grain size, b) interlamellar distance in pearlite and pearlite colony size in forgings cooled in BY line, c) volume fraction of structural constituents, d) ferrite grain size



Rys. 15. Właściwości wytrzymałościowe odkuwek wykonanych ze stali C45, C45+V oraz C45+V,Ti chłodzonych w kanale chłodzącym linii BY

Fig. 15. Strength properties of C45, C45+V and C45+V,Ti steel forgings cooled in BY line cooling channel



Rys. 16. Histogram twardości odkuwek ze stali C45

Fig. 16. Hardness histogram for C45 steel forgings

7. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych prac sformułowano następujące wnioski:

1. Założony cel projektu został zrealizowany. Opracowano technologię regulowanego kucia połączone z przyspieszonym chłodzeniem odkuwek ze stali węglowo-manganowych oraz mikrostopowych (w tym o zmodyfikowanym składzie chemicznym) przeznaczonych dla przemysłu motoryzacyjnego.
2. Opracowana technologia wytwarzania odkuwek pozwala na uzyskanie właściwości mechanicznych spełniających wymagania określone przez potencjalnych odbiorców odkuwek.
3. Wdrożenie opracowanej technologii zapewni ograniczenie kosztów produkcji odkuwek głównie dzięki wyeliminowaniu obróbki cieplnej w postaci dodatkowej operacji normalizowania, zmniejszy nakłady energetyczne oraz długość cyklu procesu produkcyjnego.

4. W ramach projektu opracowano modele rozwoju mikrostruktury, przemian fazowych stali węglowo-manganowych i mikrostopowych. Opracowane modele zastosowano do celów symulacji numerycznych procesów kucia i przyspieszonego chłodzenia odkuwek o złożonej geometrii. Weryfikację wyników symulacji numerycznych prowadzono w oparciu o dane uzyskane w badaniach przemysłowych. W efekcie tych prac uzyskano możliwość modelowania właściwości mechanicznych na podstawie parametrów procesu kucia i przyspieszonego chłodzenia oraz poszerzono bazę dostępnych danych o warunkach brzegowych i początkowych procesów wytwarzania.

W artykule podsumowano wyniki badań zrealizowanych w ramach projektu celowego 6 ZR7 2008 C/07018 dofinansowanego ze środków NCBiR, zakończonego w czerwcu bieżącego roku.

LITERATURA

1. Wegner K.: Werkstoffentwicklung für Schmiedeteile im Automobilbau, ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 100, 1985, s. 918-927
2. Huchtenmann B., Brandis H., Schmidt W.: Analyzing the Effects of Hot Forming, Heat Treating, July 1992, s. 16-25
3. Engineer S., Huchtemann B., Shueler V.: A Review of the Development and application of Microalloyed Medium-Carbon Steels, Proceedings of an International Symposium Fundamentals of Microalloying Forging Steels, Golden, Colorado, 8-10 lipca 1986, s. 19-37
4. Koyasu Y. i inni: Development of Special Steel Bars and Wire Rods for High-Strength Automobile Parts, Nippon Steel Technical Report, 53, 1992, s. 35-43
5. Charlier P., Baecker L.: Optimization of the Chemistry of a Micro-Alloyed Steel Containing 0.45% Carbon to Obtain a Tensile Strength of 1000 MPa (145 KPSI) without Heat Treatment, Proceedings of an International Symposium Fundamentals of Microalloying Forging Steels, Golden, Colorado, 8-10 lipca 1986, s. 207-216
6. Gunnarson S., Ravenshorst H., Bergstroem C.-M.: Experience with Forged Automotive Components in Precipitation Hardened Pearlitic-Ferritic Steels, Proceedings of an International Symposium Fundamentals of Microalloying Forging Steels, Golden, Colorado, 8-10 lipca 1986, s. 325-338
7. Rossi A. i inni: Development of a Nb-T i-N Steel for Production of Tractor Links, Proceedings of an International Symposium Fundamentals of Microalloying Forging Steels, Golden, Colorado, 8-10 lipca 1986, s. 351-365