Adam Klasik[1], Jerzy Sobczak[2], Krystyna Pietrzak[1], Katarzyna Makowska[1], Andrzej Wojciechowski[1]
[1)] Instytut Transportu Samochodowego
[2)] Instytut Odlewnictwa

PRAKTYCZNA WERYFIKACJA METODY RECYKLINGU KOMPOZYTOWYCH TARCZ HAMULCOWYCH

W artykule przedstawiono podstawowe aspekty recyklingu tarcz hamulcowych wykonanych z metalowych kompozytów o osnowie będącej stopem aluminium zbrojonym cząsteczkami węglika krzemu (SiC) w ilości 20% (obj.). Wykazano przydatność metody bezpośredniego przetopu do recyklingu tarcz hamulcowych odlanych z komercyjnego kompozytu firmy DURALCAN o handlowej nazwie F3S.20S, stosowanego między innymi w przemyśle samochodowym. Symulację recyklingu przeprowadzono poprzez dziewięciokrotny przetop badanego materiału odlewając z każdego przetopu próbki do badań oraz odlewając po czwartym przetopie dwie tarcze hamulcowe. Uzyskane wyniki badań szeregu charakterystyk fizycznych, mechanicznych i mikrostrukturalnych potwierdzają przydatność zaproponowanej metody recyklingu do zastosowań praktycznych. Osiągnięty pozytywny wynik odbioru technicznego tarcz hamulcowych upoważnia do twierdzenia, że zastosowana metoda bezpośredniego przetopu może stanowić rekomendacje aplikacyjne recyklingu produktowego. Podkreślono także istotną rolę w analizowanym procesie przestrzegania reżimów technologicznych odlewania.

PRACTICAL VERIFICATION OF BRAKE DISC RECYCLING

In the research the basic aspects of the recycling of vehicle brake discs made from aluminum matrix composites reinforced with SiC particles (20% vol.) are presented. The usefulness of the direct multiple recast to the recycling of the cast brake discs made from commercial composite (DURALCAN - F3S.20S) used between other in the motor industry is shown. The simulation of the recycling was realized using nine fold melt of the examined material pouring off the test specimens from any recast and pouring off the ready two brake discs after the fourth remelt. The results of the row physical, mechanical and microstructure characteristics confirmed the usefulness of proposal recycling method for practical applications. The positive effect of brake discs technical acceptance makes possible to ascertain the application recommendation of product recycling by means of used direct remelts method. The significant role of keeping of the technological regimes in the analyzed process was also underlined.

1. Wprowadzenie. Cel pracy

Obserwowany dynamiczny rozwój materiałów kompozytowych, w tym o osnowie ze stopów metali nieżelaznych dla potrzeb motoryzacji, determinuje potrzebę zarówno doskonalenia metod wytwarzania, jak i opracowywanie metod recyklingu materiałów i wyrobów po okresie eksploatacji.

Wzrost zainteresowania kompozytami jest związany między innymi z szeregiem ich atrakcyjnych właściwości użytkowych i z możliwością obniżenia masy pojazdów, co wpływa korzystnie na ich parametry techniczne (m.in. zmniejszenie zużycia paliwa), a tym samym sprzyja ochronie środowiska [1, 2].

Wzrost ten obliguje konstruktorów i producentów wyrobów do skupienia się na działaniach związanych z powtórnym wprowadzaniem do obiegu produkcyjnego materiałów pochodzących z recyklingu.

Opracowana przez Instytut Odlewnictwa i Instytut Transportu Samochodowego technologia wytwarzania kompozytowych tarcz hamulcowych, z uwzględnieniem ich recyklingu, spełnia te wymagania.

Niniejszy artykuł dotyczy recyklingu tarcz hamulcowych wykonanych z komercyjnego kompozytu F3S.20S o osnowie ze stopu aluminium A359 zawierającego 20% (obj.) węglika krzemu (SiC). Tarcza hamulcowa jako część samochodowa jednoznacznie identyfikowalna i stosunkowo łatwa do pozyskania z wyeksploatowanego pojazdu, nadaje się do recyklingu materiałowego.

Jednym ze sposobów recyklingu, stosunkowo łatwym do przeprowadzenia i uzasadnionym ekonomicznie, jest wielokrotny bezpośredni przetop. W pracy wykazano, że kompozyty metalowe o osnowie ze stopów aluminium zbrojone cząsteczkami SiC można poddawać takiemu procesowi bez potrzeby rozdzielania fazy zbrojącej od osnowy metalowej - muszą one jednak spełnić szereg warunków.

Jeden z podstawowych poglądów panujących w odlewnictwie stanowi o tym, że liczba przetopów jakiegokolwiek materiału jest ograniczona do kilku, ponieważ później materiał i tak traci swoje właściwości odlewnicze [3]. Jednocześnie istotne jest to, aby wyrób wycofany z eksploatacji poddać, przed pierwszym i każdym następnym przetopem, starannemu oczyszczeniu z wszelkich zanieczyszczeń, które mogły pojawić się w czasie jego eksploatacji.

Problemy dotyczą również samego procesu wytwarzania odlewanych kompozytów aluminiowych zbrojonych cząsteczkami SiC. Bardzo istotne, z punktu widzenia zarówno możliwości ich odlewania, jak i końcowych właściwości użytkowych, są między innymi:

- temperatura procesu odlewania,
- skład chemiczny osnowy metalowej,
- zawartość i cechy morfologiczne fazy zbrojącej,
- reakcje na granicach fazowych między zbrojeniem a osnową metalową kompozytu.

Jedną z istotnych przyczyn obniżających właściwości wytrzymałościowe kompozytu [4] jest rozpad SiC wg reakcji:

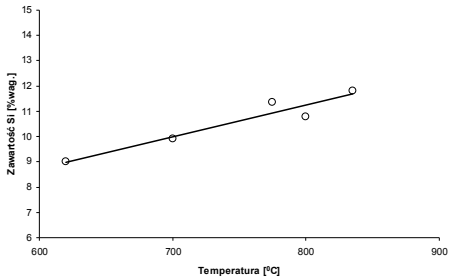
$$4Al + 3SiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Si$$

i powstawanie, w wyniku tej reakcji, wydzieleń węglika glinu (Al_4C_3) oraz kryształów czystego krzemu (Si). Reakcja ta jest szkodliwa przede wszystkim z trzech powodów:

- powstawania wydzieleń Al_4C_3, które tworzą się na granicy zbrojenie-osnowa metalowa obniżając zarówno wytrzymałość fazy zbrojącej, jak i wytrzymałość

granic międzyfazowych i w konsekwencji pogarszając charakterystyki wytrzymałościowe całego kompozytu,
- Al_4C_3 jako związek niestabilny (jest higroskopijny) w niektórych środowiskach stanowi przyczynę zwiększenia skłonności kompozytu do korozji,
- powstawanie Al_4C_3 powoduje zmiany zawartości krzemu w stopie i w przypadku, kiedy reakcja ta ma przebieg intensywny, skład stopu osnowy może ulec istotnej i zarazem negatywnej zmianie.

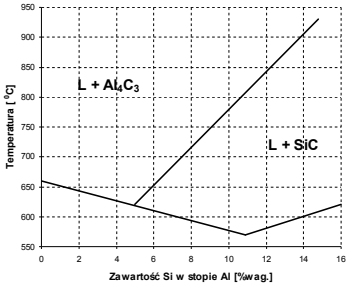
Kinetyka rozważanej reakcji zależy przede wszystkim od zawartości krzemu w osnowie metalowej. Zapewnienie wymaganej barierowej zawartości krzemu (Si) (na poziomie co najmniej 8% wag., zależnym również od temperatury) zapobiega tworzeniu się Al_4C_3. Zawartość ta dla różnej temperatury odlewania pokazana jest na rys.1.



Rys. 1. Wymagana zawartość Si w osnowie kompozytów zbrojonych SiC dla różnej temperatury eliminująca możliwość powstawania Al_4C_3 (opracowano na podstawie [4])
Fig. 1. Required Si content in the matrix of the composites reinforced with SiC particles for various temperature eliminating a possibility of Al_4C_3 creation (based on[4])

Duży wpływ na przebieg przedstawionej reakcji ma również temperatura a także czas wytrzymania w danej temperaturze odlewania (powinien on być możliwie krótki) [5].

Wymienionymi przesłankami kieruje się jedna z czołowych firm na świecie – Duralcan Co. Kanada, produkująca aluminiowe kompozyty zbrojone cząsteczkami SiC [6]. Przestrzega ona w swojej procedurze technologicznej reżimów dotyczących składu chemicznego osnowy metalowej, temperatury procesu i czasu odlewania kompozytów podając równocześnie, w postaci odpowiednich wykresów, warunki sprzyjające tworzeniu się destrukcyjnego Al_4C_3.



Rys. 2. Obszar stabilności SiC w zależności od zawartości Si i temperatury odlewania (opracowano na podstawie [6])
Fig. 2. SiC stability area in the function of Si content and cast temperature (based on [6])

Jeden z nich zilustrowany został już wcześniej (rys. 1) zaś drugi związany jest z obszarem stabilności SiC (rys. 2).

W celu zapewnienia lepszej stabilności SiC stosuje się również różne sposoby wytwarzania barier bezpośrednio na cząsteczkach zbrojenia. Realizuje się to na przykład poprzez tworzenie różnorodnych pokryć na SiC w postaci Al_2O_3, TiO_2, TiB_2, SiO_2, TiC, TiN lub warstw protektorowych w postaci czystych metali - na przykład Ta, Ni czy Cu. Warstwy te poprawiają również zwilżalność pomiędzy zbrojeniem i metalową osnową.

Należy także podkreślić, że zastosowanie metody bezpośredniego przetopu do kompozytów o innej osnowie metalowej albo o innej fazie zbrojącej wymaga przeprowadzenia systematycznych badań dla każdego kompozytu oddzielnie (ze względu na niebezpieczeństwo występowania różnych reakcji na granicy osnowa/zbrojenie).

2. Materiał do badań

Do badań wytypowano komercyjny kompozyt na bazie stopu aluminium A359 (AlSi9Mg), zbrojony dyspersyjnie cząsteczkami SiC w ilości 20% (obj.), wyprodukowany w postaci gąsek przez firmę Duralcan Co. (oznaczenie F3S.20S). Skład chemiczny gąsek, wynikający z atestu producenta, podano w tabeli 1.

Tabela 1

Skład chemiczny metalowej osnowy kompozytu aluminiowego zbrojonego SiC

Table 1

Chemical composition of the matrix of aluminum composite reinforced with SiC particles

Gatunek	Skład chemiczny % wag.								Zawartość SiC % obj.
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	
F3S.20S	9,2	0,12	<0,01	0,02	0,54	<0,01	0,10	reszta	20,8

3. Symulacja procesu recyklingu

Próbki do badań odlewano grawitacyjnie do kokili żeliwnej. Wsad topiono w piecu tyglowym PET typu TS-PET-96/501. W trakcie odlewania kąpiel mieszano ręcznie w celu otrzymania odlewów o równomiernym rozmieszczeniu cząsteczek zbrojących w kompozycie. Do pomiaru temperatury ciekłego metalu stosowano termoparę typu AOT-2 NiCr-NiAl. Temperaturę kokili mierzono termoparą kontaktową typu THERM 2120.

Przyjęto następujące parametry technologiczne odlewania:

- temperatura kąpieli 720°C ± 5°C,
- temperatura kokili 190°C ± 10°C.

Symulację procesu recyklingu wyrobu przeprowadzono poprzez przetopienie materiału wyjściowego i odlaniu pierwszej partii próbek. Pozostały ciekły metal odlano w postaci gąsek. Po zakrzepnięciu i ostudzeniu gąski ponownie załadowano do pieca i przetopiono. Następnie kompozyt odlano do formy kokilowej (przetop drugi symulujący recykling), a resztę metalu odlano w postaci gąsek. Proces ten powtarzano 8 razy, uzyskując 9-cio krotny przetop tego samego materiału.

Wprowadzono jednakowe, następujące oznaczenia próbek:

- cyfra pierwsza oznacza kompozyt F3S.20S,
- cyfra druga oznacza nr przetopu: 1 – 9 – (kolejne przetopy),

w wyniku czego na przykład oznakowanie 2.3. oznacza kompozyt po trzecim przetopie.

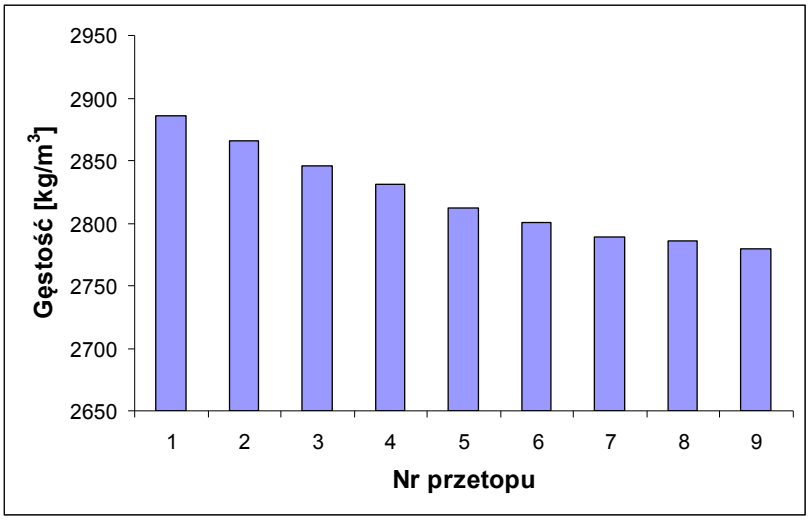
Następnie przeprowadzono badania radiograficzne w celu wyeliminowania z materiału badawczego próbek wadliwych (wady odlewnicze i nieciągłości materiałowe). W wyniku tego, w zależności od kolejnego przetopu, uzyskano od 75% do 90% odlewów dobrych, kwalifikujących się do dalszych, kompleksowych badań.

4. Wyniki badań własnych

4.1. Gęstość kompozytu

Celem badania było określenie zmiany gęstości kompozytu F3S.20S, a tym samym wzrostu stopnia zagazowania po kolejnych przetopach.

Uzyskane wyniki przedstawiono w formie wykresu ilustrującego stopniowe zmniejszanie się gęstości kompozytu po kolejnych przetopach (rys. 3.).



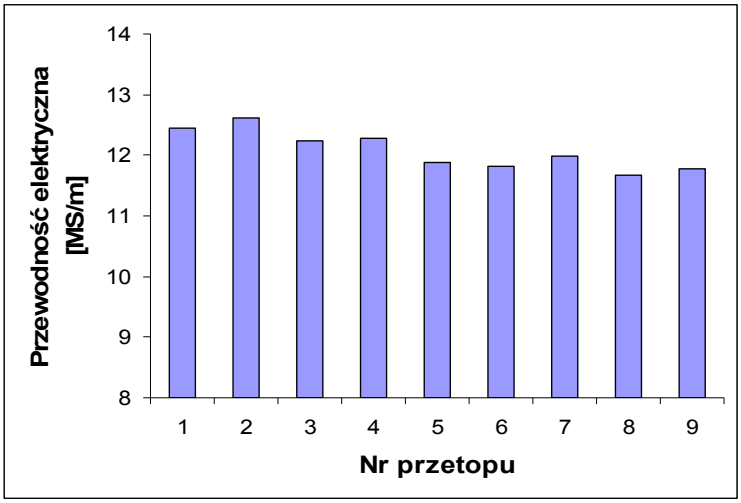
Rys. 3. Gęstość kompozytu F3S.20S po kolejnych przetopach
Fig. 3. Density of F3S.20S composite after the successive remelts

Przy podejmowaniu zatem prób wielokrotnego przetopu konieczne jest przeprowadzenie takiej optymalizacji tego procesu, która zminimalizuje niebezpieczeństwo tworzenia się pęcherzy gazowych (np. odlewanie ciśnieniowe czy squeeze casting).

4.2. Przewodność elektryczna

Przewodność elektryczna stanowi istotny parametr umożliwiający ocenę równomierności rozłożenia fazy zbrojącej w kompozycie i jednorodności makrostruktury. Cząsteczki fazy zbrojącej SiC powodują, że jakiekolwiek nierównomierne rozłożenie tej fazy jest natychmiast identyfikowane jako obszary o zróżnicowanej (niższej lub wyższej) przewodności elektrycznej.

Uzyskane wyniki badań przedstawiono w formie wykresu ilustrującego zmianę przewodności elektrycznej po kolejnych przetopach (rys. 4.).



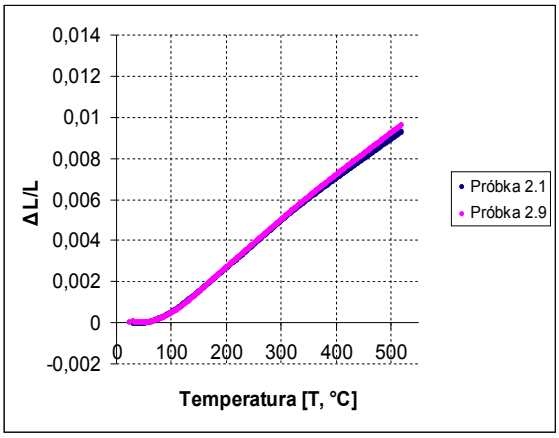
Rys. 4. Przewodność elektryczna kompozytu F3S.20S po kolejnych przetopach
Fig. 4. Electrical conductivity of F3S.20S composite after the successive remelts

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że przewodność elektryczna kompozytu F3S.20S stopniowo maleje wraz z liczbą przetopów.

4.3. Dylatacja

Dylatacja – względna zmiana wymiaru liniowego jest wielkością indywidualną dla danej substancji, ilościowo charakteryzującą jej rozszerzalność cieplną pod wpływem temperatury. Zmiany wymiarów pod wpływem zmian temperatury są niepożądane, ponieważ mogą być przyczyną powstawania naprężeń wewnętrznych, a nawet zniszczenia materiału.

Uzyskane wyniki badań dylatacji przedstawiono w formie wykresu ilustrującego zmiany względnego wymiaru liniowego $\Delta L/L$ kompozytu w zależności od temperatury po 1 i 9 przetopie (rys. 5).

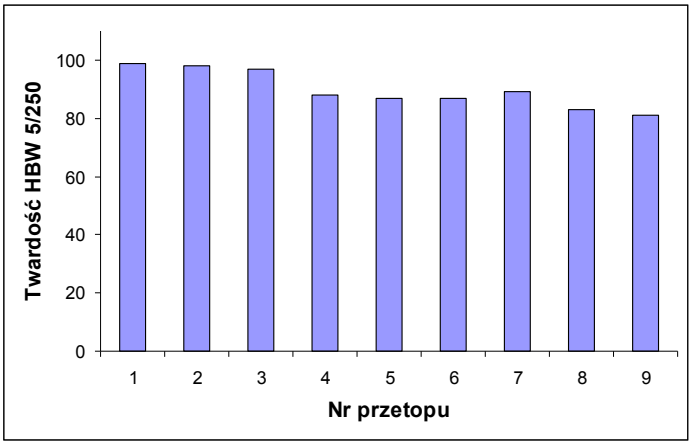


Rys. 5. Wyniki badań względnego wymiaru liniowego (dylatacji) $\Delta L/L$ kompozytu w funkcji temperatury po 1 i 9 przetopie
Fig. 5. Results of the relative linear dimension (the dilatation) $\Delta L/L$ of the composite in the function of the temperature after the first and ninth remelts

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dziewięciokrotny przetop nie powoduje istotnych zmian charakterystyk dylatacyjnych w funkcji temperatury.

4.4. Twardość

Pomiary twardości wykonywano wg PN-EN ISO 6506-1:2002, sposobem Brinella HBW 5/250, przy użyciu twardościomierza typu HPO-250. Wynik badań przedstawiono w postaci wykresu (rys. 6.)

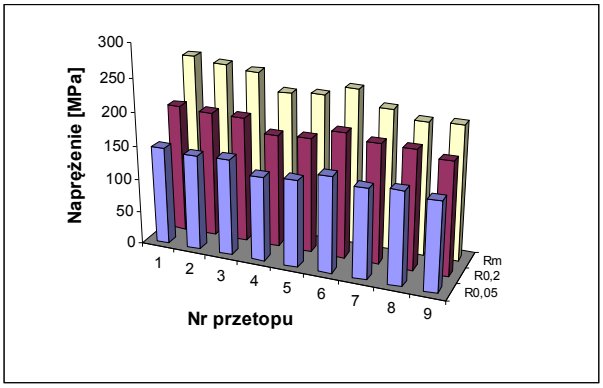


Rys. 6. Twardość (HBW 5/250) kompozytu po kolejnych przetopach
Fig. 6. Hardness (HBW 5/250) of the composite after the successive remelts

W oparciu o przeprowadzone pomiary twardości stwierdzono, że twardość HBW zmniejsza się wraz ze wzrostem liczby przetopów i po 9 przetopie zmniejszyła się o 18% w stosunku do twardości wyjściowej.

4.5. Właściwości wytrzymałościowe

Badania podstawowych właściwości mechanicznych przeprowadzono podczas statycznej próby rozciągania wg PN-EN ISO 10002-1:2004, na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8874. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci wykresu (rys. 7.).



Rys. 7. Porównanie podstawowych właściwości wytrzymałościowych kompozytu po kolejnych przetopach
Fig. 7. Comparison of the basic mechanical properties of the composite after the successive remelts

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że wraz z kolejnymi przetopami następuje stopniowe pogarszanie się większości charakterystyk mechanicznych, wynikających ze statycznej próby rozciągania, w tym wytrzymałości na rozciąganie (R_m), której wartość zmniejszyła się o 19% po 9 przetopie w stosunku do wytrzymałości wyjściowej oraz granicy sprężystości ($R_{0,05}$) i granicy plastyczności ($R_{0,2}$), których wartości zmniejszyły się odpowiednio o 9% i 11%.

4.6. Właściwości tribologiczne

Do badania właściwości tribologicznych zastosowano tester T-11 ze skojarzeniem trzpień-tarcza (pin-on-disk).

Badania tribologiczne przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego, w stałych warunkach środowiskowych:

- temperatura 21^{o}C,
- wilgotność względna 55%.

Warunki przeprowadzenia badań tribologicznych podano w tabeli 2.

Tabela 2

Warunki testów tribologicznych

Table 2

Conditions of the tribological tests

Rodzaj tarcia	Prędkość poślizgu	Obciążenie	Droga tarcia	Nacisk jednostkowy	Średnica próbki
Technicznie suche	0,5 m/s	10 N	2500 m	0,8 MPa	4 mm

W trakcie badań prowadzono ciągły pomiar i rejestrację siły tarcia, zużycia liniowego i temperatury otoczenia węzła tarcia.

Odporność na zużycie ścierne określano metodą wagową. Przeciwpróbka wykonana była ze stali 4140, a otrzymane wyniki badań dotyczą węzła tarciowego – kompozyt F3S.20S i stal 4140. Stanowią one przyczynek do badań eksploatacyjnych, dla których założono, że wyniki testów potwierdzą niezmienność właściwości tribologicznych po kolejnych przetopach materiału kompozytowego tarczy hamulcowej i odpowiednio dobranego klocka hamulcowego.

W tabeli 3 zestawiono określone eksperymentalnie wartości liczbowe współczynnika tarcia, zużycia liniowego i temperatury otoczenia węzła tarcia.

Tabela 3

Wyznaczone wartości współczynnika tarcia, zużycia liniowego i temperatury węzła tarcia

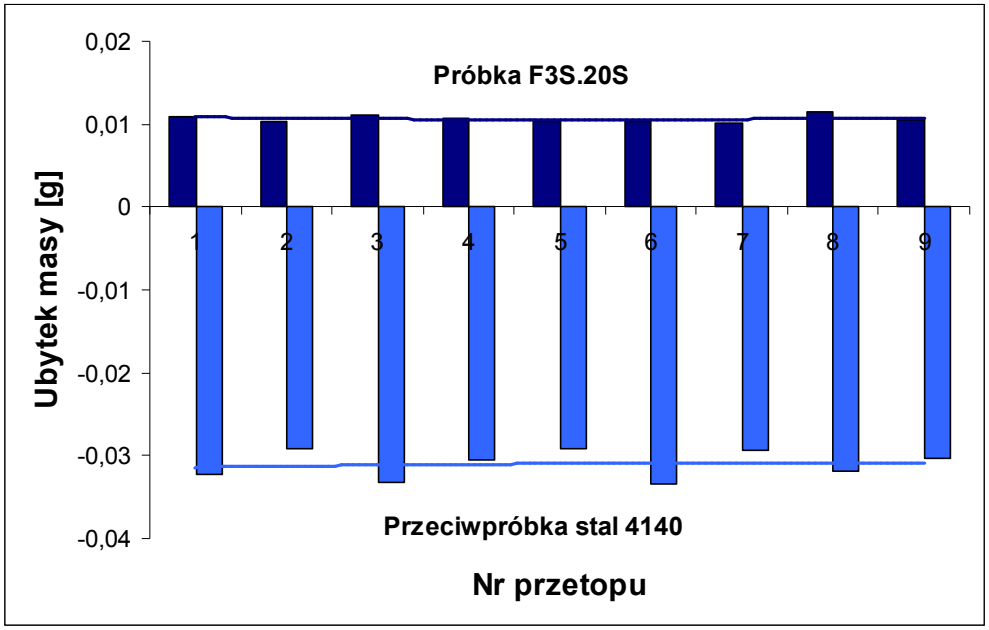
Table 3

Determined values of friction coefficient, linear wear and the temperature of the friction set

Materiał próbki	Materiał przeciwpróbki	Współczynnik tarcia $\mu_{średnie}$	Zużycie liniowe [μm]	Temperatura węzła tarcia [°C]
F3S.20S	stal 4140	0,68	235	31,2

Dane liczbowe w tabeli 3 stanowią wartości średnie, pochodzące z całego zbioru próbek, ponieważ nie odnotowano istotnego wpływu kolejnego przetopu na wartości wyznaczanych parametrów.

Natomiast uzyskane wyniki badań odporności na zużycie ścierne przedstawiono na wykresie (rys. 8.)



Rys. 8. Wyniki badań odporności na zużycie ścierne próbek i przeciwpróbek po kolejnych przetopach

Fig. 8. Results of the abrasive wear of samples and anti-samples after the successive remelts

Można zatem stwierdzić, że zastosowany wielokrotny przetop (9 razy) nie wpływa istotnie na odporność na zużycie ścierne kompozytu F3S.20S. Ubytek masy w warstwie wierzchniej jest spowodowany ścieraniem się współpracujących materiałów wskutek mikroskrawania, rysowania lub bruzdowania oraz towarzyszącym mu wykruszaniem się twardych cząsteczek SiC (intensyfikujących proces ścierania) z osnowy kompozytu.

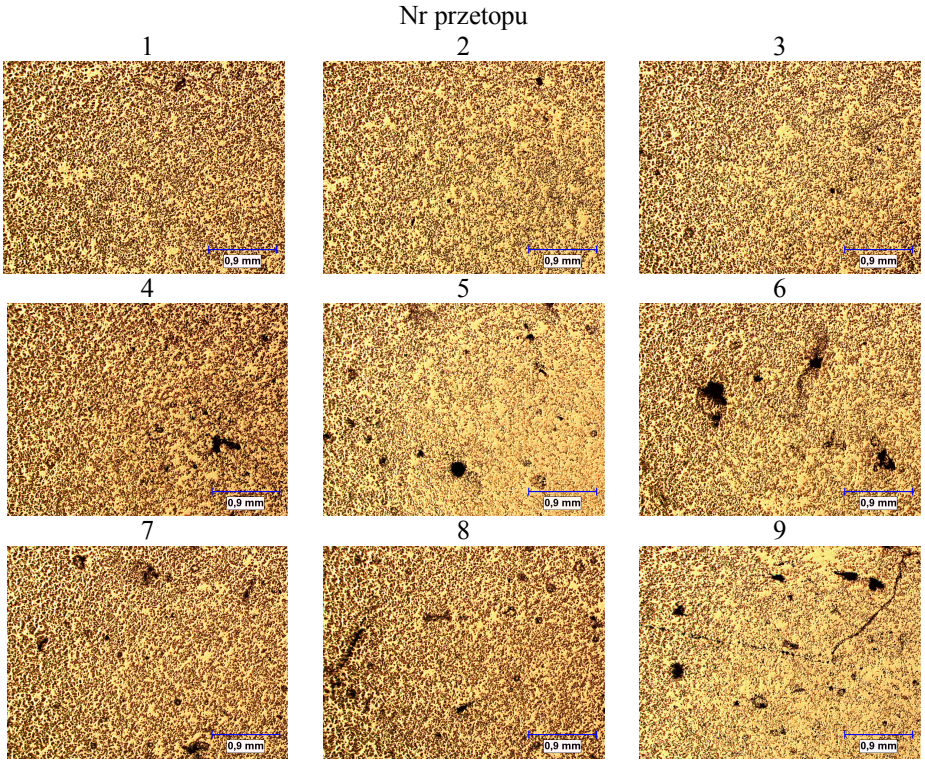
4.7. Mikrostruktura

Celem jakościowych badań metalograficznych z użyciem mikroskopii świetlnej (mikroskop Olympus PMG3) było dokonanie orientacyjnej oceny ewentualnych różnic mikrostrukturalnych na jakie mógł mieć wpływ kolejny przetop kompozytu. Wszystkie zgłady metalograficzne przeznaczone do badań przygotowywano na urządzeniach firmy STRUERS.

Zamieszczone fotografie (rys. 9.), wykonane przy powiększeniu 25 razy, mają na celu uwidocznienie makro zmian występujących po zastosowaniu wielokrotnego przetopu.

Z dokumentacji fotograficznej (rys. 9.) wykonanej przy niewielkim powiększeniu wynika jedynie występowanie nieciągłości strukturalnych w postaci porowatości gazowo-skurczowej, o czym świadczą zaokrąglone kształty pęcherzy występujących w kompozycie po wszystkich przetopach (zjawisko to nasila się wraz z numerem przetopu).

Równocześnie nie zaobserwowano niekorzystnych zmian mikrostrukturalnych na granicy międzyfazowej zbrojenie/osnowa metalowa (powstawania Al_4C_3).



Rys. 9. Efekt 9 krotnego przetopu kompozytu F3S.20S z widocznymi nieciągłościami materiałowymi (pow. 25 razy)

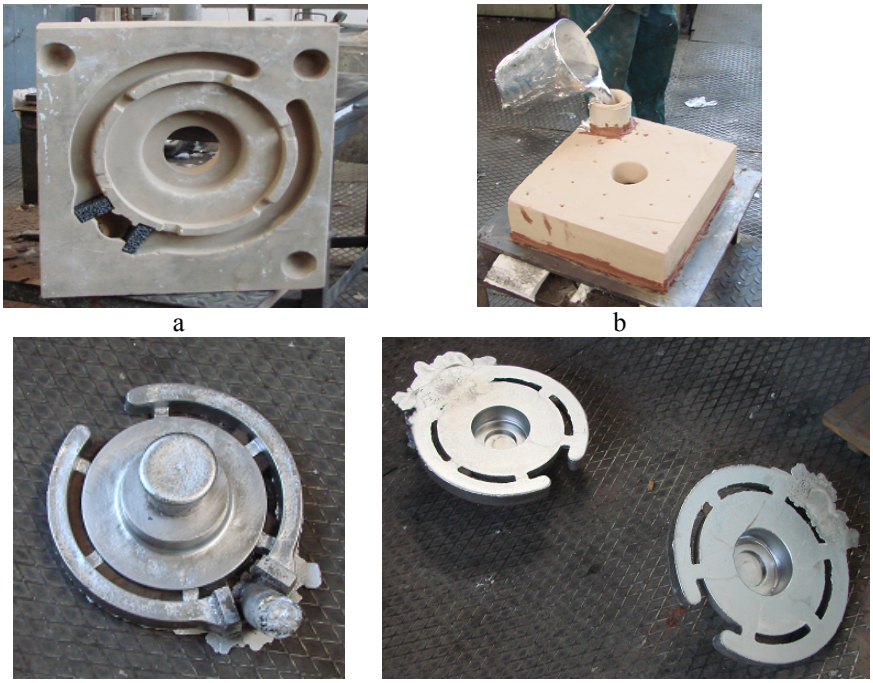
Fig. 9. Effect of nine-fold recast of F3S.20S composite with the visualized material discontinuities (magnitude - 25×)

Jednocześnie na podstawie przeprowadzonych badań metodami metalografii ilościowej można stwierdzić, że dziewięciokrotny przetop kompozytu F3S.20S nie zmienia udziału objętościowego i średnicy cząsteczek fazy zbrojącej, co może pośrednio świadczyć zarówno o braku niekorzystnych zjawisk na granicy zbrojenie/osnowa metalowa jak, też niewystępowania zjawiska opadania na dno lub wypływania fazy zbrojącej na powierzchnię kąpieli metalowej i przechodzenia jej do żużla.

5. Praktyczna weryfikacja metody recyklingu

W oparciu o wyniki badań próbek otrzymanych poprzez wielokrotny przetop kompozytu, których charakterystyki okazały się, jeszcze po czwartym przetopie, zbliżone do charakterystyk materiału wyjściowego, podjęto próbę wykonania odlewu tarcz hamulcowych po tym przetopie.

Wykonano dwa odlewy grawitacyjne do kokili piaskowej. Parametry technologiczne odlewania były takie same, jak w przypadku odlewania próbek do badań (temperatura kąpieli 720°C $\pm$ 5°). Na rys. 10. przedstawiono połówkę formy piaskowej, moment zalewania i gotowe odlewy.

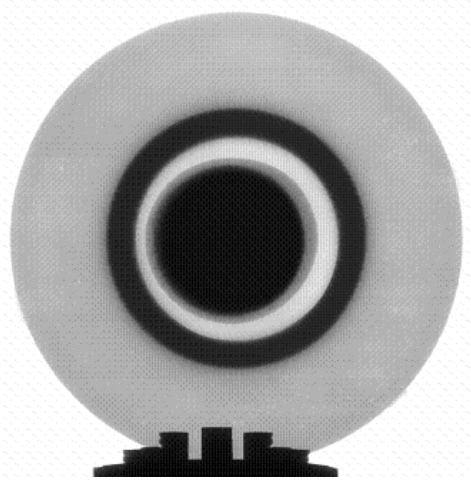


Rys. 10. Połówka piaskowej formy tarczy hamulcowej (a), moment zalewania (b) i gotowe odlewy (c, d)

Fig. 10. The half of the sand mould of the brake disc (a), the moment of pouring into the mould (b) and ready casts (c, d)

6. Odbiór techniczny gotowego wyrobu

W celu wykrycia ewentualnych wad odlewniczych uzyskane odlewy tarczy hamulcowej poddano badaniom radiograficznym (rys. 11.).

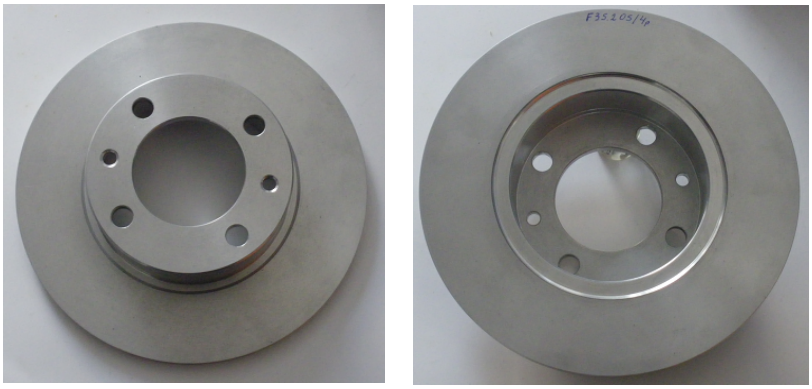


Rys. 11. Radiogram odlanej tarczy hamulcowej

Fig. 11. Radiogram of the cast brake disc

Na podstawie przeprowadzonych badań i w oparciu o wymagania dotyczące jakości wg PN-EN 12681/ASTM-E 446/186, 3 poziom bezpieczeństwa, stwierdzono, że tarcze hamulcowe po 4. przetopie spełniają wymagane kryteria.

W kolejnym etapie tarcze poddano obróbce skrawającej (rys. 12.) i ponownym badaniom radiologicznym. Zastosowano w tym przypadku coraz częściej wprowadzaną w przemyśle motoryzacyjnym tomografię komputerową.

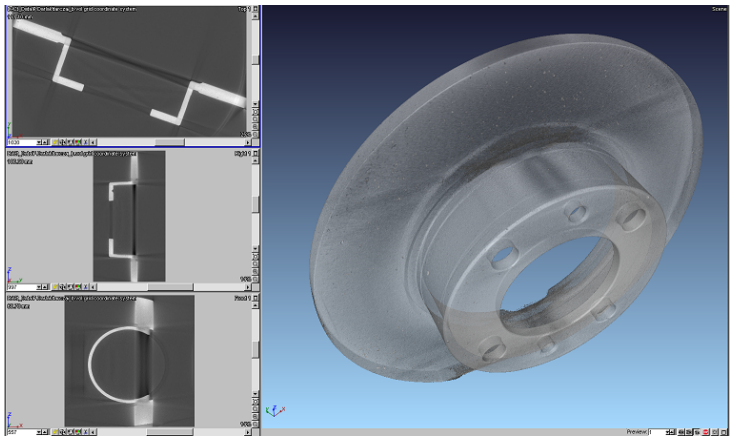


Rys. 12. Tarcza hamulcowa po obróbce skrawającej
Fig. 12. Brake disc after the machining

Do oceny wykorzystano tomograf v|tome|x L 450 o wysokiej rozdzielczości dla tomografii komputerowej 3D i badań rentgenowskich 2D o następujących parametrach:

1. Rodzaj źródła promieniowania X – rtg
2. Typ detektora DXR-4096-200
3. Napięcie/Prąd 250 kV/100 μA
4. Czas ekspozycji 500 ms

Przykładowy obraz powstały w wyniku przeprowadzonego testu przedstawia rys. 13.

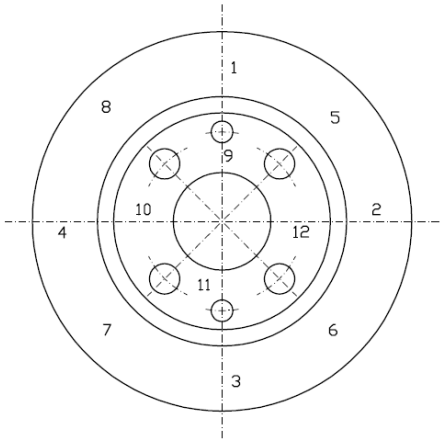


Rys. 13. Obraz tarczy hamulcowej uzyskany na tomografie komputerowym 3D
Fig. 13. Brake disc image obtained by means of scanner 3D

Na podstawie przeprowadzonych badań metodą tomografii komputerowej nie stwierdzono występowania wad materiałowych wykraczających poza wymagania norm.

W celu określenia, w oparciu o testy nieniszczące, jednorodności mikrostruktury,

w tym równomierności rozłożenia fazy zbrojącej w kompozycie F3S.20S, przeprowadzono badanie przewodności elektrycznej. Miejsca pomiarów i wynik średni z pięciu pomiarów wykonanych w danym obszarze przedstawiono na rys 14.



Miejsce pomiaru	Przewodność elektryczna [MS/m]
1	12,68
2	12,94
3	12,68
4	12,68
5	12,85
6	12,86
7	12,67
8	12,70
9	12,71
10	12,66
11	12,65
12	12,74

Rys. 14. Tarcza hamulcowa – miejsce dokonania pomiarów przewodności elektrycznej i uzyskane wyniki

Fig. 14. Brake disc - the localization of electrical conductivity measurement and the results

Przeprowadzone badania wykazały, że różnica pomiędzy wynikiem maksymalnym a minimalnym wynosi 0,29 MS/m tj. 2,2%. Stwierdzone niewielkie różnice w zakresie wyznaczonych wartości przewodności elektrycznych świadczą o równomierności rozłożenia fazy zbrojącej.

7. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań kompozytu F3S.20S po wielokrotnym przetopie można stwierdzić, że wszystkie wyznaczone właściwości pogarszają się jedynie w niewielkim stopniu, szczególnie do piątego przetopu. Niemniej jednak dalszy recykling nie dyskwalifikuje przetopionego materiału, a jedynie może ograniczyć zakres jego zastosowania.

Praktyczną weryfikację metody recyklingu uzyskano poprzez odlanie gotowego wyrobu w postaci tarcz hamulcowych. Tarcze odlane po czwartym przetopie poddano typowym, zgodnym z wymaganiami odbioru technicznego, testom. Potwierdziły one możliwość ponownego zastosowania tarcz w układzie hamulcowym pojazdu, z pełnymi gwarancjami ich charakterystyk użytkowych, a zatem również bezpieczeństwa użytkowania.

Wykazano, że bezpośredni wielokrotny przetop stanowi właściwy sposób recyklingu w odniesieniu do takiego kompozytu (i wyrobów z niego wytwarzanych dla potrzeb przemysłu motoryzacyjnego), co rekomenduje go do bezpośrednich zastosowań aplikacyjnych w aspekcie odzysku zarówno materiałowego, jak i produktowego.

Należy w tym miejscu podkreślić, że końcowy efekt pracy można odnosić tylko do przebadanego kompozytu F3S.20S. Ze względu na możliwość występowania, zwłaszcza podczas wielokrotnych przetopów, niekorzystnych reakcji na granicy zbrojenie/osnowa, (powstawanie Al_4C_3) każdy przypadek materiałowy (inna osnowa lub zbrojenie) należy

oddzielnie i wnikliwie przeanalizować. Niemniej jednak, zasadne wydaje się twierdzenie o celowości kontynuacji podobnych badań w odniesieniu do innych grup materiałowych, przy uwzględnieniu wszystkich uwarunkowań termodynamicznych. Wykazanie możliwości recyklingu materiałów kompozytowych drogą bezpośredniego przetopu znacznie wzmocni atrakcyjność ich stosowania w różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych, również z ekologicznego i ekonomicznego punktu widzenia [7].

LITERATURA:

[1] Rudnik D., Sobczak J.; "Tłoki kompozytowe do silników spalinowych ", ISBN 83-913045-6-6, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa, 2001,
[2] Wojciechowski A., Sobczak J.; "Kompozytowe tarcze hamulcowe pojazdów drogowych", ISBN 83-913045-6-6, Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa, 2001,
[3] Górny Z., Sobczak J.; "Nowoczesne tworzywa odlewnicze na bazie metali nieżelaznych, ISBN 83-918918-1-X, ZA-PIS, Kraków 2005,
[4] Labib A., "L'effet des niveaux de refroidissement (température de du moule) et des traitements Thermiques sur les propriétés mécaniques et sur la Microstructure des deux alliages composites Al-Si-Mg/SiC/10p", Université du Québec à Chicoutimi, Québec 1993, thesis,
[5] Lloyd D.J., Dewing E.; "Stability of SiC in Molten Aluminum", Advanced Structural Materials (ed. D.S. Wilkinson), Pergamon Press, New York, (1989), pp. 71-78,
[6] Tongxiang F., Yang G., Chen J., Zhang D., Shi Z., Shibayanagi T. and Naka M.; "Recycling Mechanism of Discontinuously Reinforced Al Matrix Composites", Materials Science Forum Vol. 502 (2005) pp. 205-209,
[7] Klasik A.; „Badania kompozytów aluminiowych w aspekcie wielokrotnego wykorzystania w budowie maszyn na przykładzie tarcz hamulcowych", Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2010.