

Badania właściwości reologicznych wybranych powłok ochronnych stosowanych na formy i rdzenie piaskowe

Ł. Jamrozowicz¹, J. Kolczyk², N. Matonis, D. Woźniak

^{1,2} AGH University of Science and Technology. Faculty of Foundry Engineering.
Reymonta 23, 30-059 Krakow, Poland

Kontakt korespondencyjny: e-mail: ¹ljamroz@agh.edu.pl; ²kolczyk@agh.edu.pl;

Otrzymano 20.11.2015; zaakceptowano do druku 29.12.2015

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki badań reologicznych powłok ochronnych: wodnej i alkoholowej, o trzech lepkościach umownych 10, 20 i 30 sekund. Badania lepkości dynamicznej prowadzono na lepkościomierzu rotacyjnym Rheotest 2. W wyniku przeprowadzonych pomiarów uzyskano krzywe płynięcia i wyznaczono zależność szybkości ścinania do lepkości dynamicznej, co pozwoliło sklasyfikować badane powłoki pod względem reologicznym.

Słowa kluczowe: Teoretyczne podstawy procesów odlewniczych, Formy piaskowe, Powłoka ochronna, Właściwości reologiczne, Lepkość kinematyczna i dynamiczna.

1. Wprowadzenie

Normy środowiskowe w zakresie emisji do atmosfery lotnych substancji wymuszają stosowanie ulepszonych technologii w odlewnictwie. W obszarze powłok ochronnych w celu ograniczenia stosowania łatwo parujących substancji, odchodzi się od stosowania powłok ochronnych na bazie alkoholu na rzecz powłok na bazie wody [1].

Jakość odlewu w dużej mierze zależy od przygotowania formy odlewniczej. Aby zabezpieczyć przed penetracją ciekłego metalu do przestrzeni międzyziarnowych formy, jej powierzchnię pokrywa się powłoką ochronną. Jednakże, aby powłoka ochronna spełniła swoje zadanie, musi być odpowiednio przygotowana, naniesiona i mieć odpowiednią grubość. Zadaniem powłok ochronnych jest przede wszystkim zabezpieczenie przed przypaleniem się tworzywa formy do odlewu, polepszenie gładkości powierzchni odlewu, ułatwienie usunięcia odlewu z formy. Dlatego też powłoki powinny odznaczać się [2]:

- ogniotrwałością wyższą niż temperatura wlewanego do wnętrza formy ciekłego stopu odlewniczego,
- odpowiednią wytrzymałością powierzchniową silnie związaną z powierzchniową warstwą tworzywa formy lub rdzenia,
- odpowiednią przepuszczalnością,
- brakiem reaktywności z tlenkami metali w podwyższonej temperaturze.

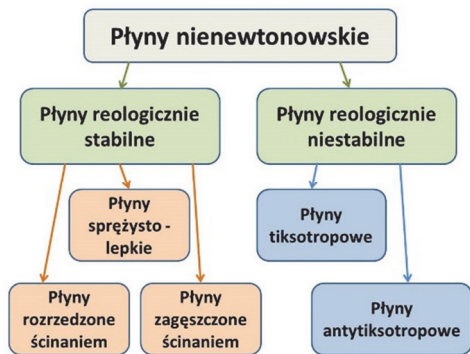
Lepkość jest jedną z ważniejszych właściwości powłoki ochronnej, która wpływa na sposób nanoszenia, czy powstała grubość warstwy powłoki. Złe dobrana lepkość powłoki spowoduje, że uzyskana grubość warstwy będzie za mała – czyli powłoka nie spełni swojego zadania lub za duża, co może sprzyjać jej pękaniu i prowadzić do powstawania żyłek na powierzchni odlewu. Ponadto źle dobrana lepkość powłoki będzie utrudniać jej nanoszenie, co sprzyjać będzie powstawaniu warstwy o nierównomiernej grubości [2-5].

W praktyce odlewniczej najczęściej do określenia lepkości powłoki podaje się czas wypływu powłoki z kubka Forda

o określonym prześwicie, najczęściej przez otwór 4 mm, jest to tak zwana lepkość umowna.

Aby wyznaczyć właściwości reologiczne powłoki, czyli gęstość, lepkość dynamiczną i kinematyczną, krzywe płynięcia czy krzywe lepkości należy przeprowadzić badania przy pomocy wiskozymetru [6-7]. Najprostsza klasyfikacja dzieli płyny na newtonowskie i nienewtonowskie.

Płyny newtonowskie (płyny doskonale lepkie) opisać można za pomocą modelu lepkości. Są to płyny, w których lepkie rozproszenie energii następuje w wyniku zderzeń stosunkowo małych cząstek. Wykres reologiczny płynu newtonowskiego sporządzamy w układzie współrzędnych naprężenia ścinającego jako funkcji szybkości ścinania. Wykres taki nazywamy krzywą płynięcia i jest to linia prosta, przechodząca przez początek układu współrzędnych [8-9]. Natomiast wszystkie cieczki, dla których krzywa płynięcia nie jest linią prostą przechodzącą przez początek układu współrzędnych, nazywamy płynami nienewtonowskimi [8-9]. W zależności od wykazywanych właściwości reologicznych płyny nienewtonowskie można sklasyfikować według poniższego schematu (rys. 1).



Rys. 1. Klasyfikacja płynów nienewtonowskich [11]

Zachowanie typowe dla cieczy nienewtonowskich zazwyczaj wykazują zawiesiny koloidalne i inne układy dyspersyjne.

2. Opis aparatury pomiarowej

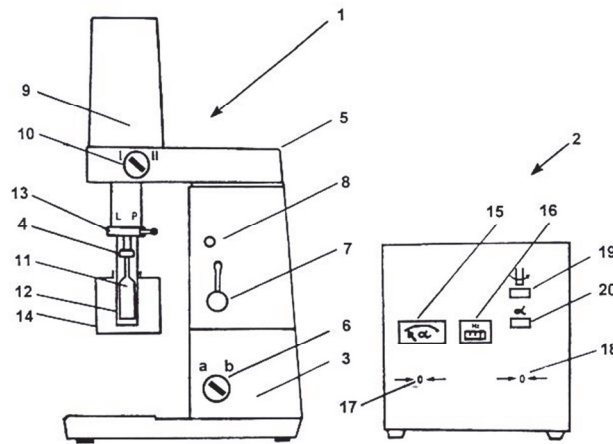
W pierwszej kolejności przeprowadzono badania lepkości umownej kubkiem Forda o średnicy wypływu otworem 4 mm. Pomiar polegał na napełnieniu kubka ciekłą powłoką, następnie dopuszczenie do swobodnego wypływu przez otwór. Czas zupełnego wypływu powłoki odczytano w sekundach.

Na podstawie uzyskanych wyników lepkości umownej z diagramu zależność czasu wypływu cieczy wzorcowej z kubka wypływowego (rys. 2) od lepkości kinematycznej dla otworu wypływowego 4 mm odczytana została wartość lepkości kinematycznej dla powłok ochronnych.



Rys. 2. Kubek wypływowy Forda (4 mm) [10]

Natomiast pomiar lepkości dynamicznej powłok ochronnych stosowanych na formy i rdzenie piaskowe wykonano za pomocą lepkościomierza rotacyjnego Rheotest 2, który służy do badania charakterystyki reologicznej płynów o dużym zakresie szybkości ścinania, naprężeń ścinających i lepkości dynamicznej (rys. 3).



Rys. 3. Schemat lepkościomierza rotacyjnego Rheotest 2: 1 - wiskozymetr, 2 – elektroniczna część pomiarowa, 3 - napęd, 4 - sprzęgło ryglowe, 5 - mostek przekładni, 6 - przełącznik obrotów, 7 - dźwignia przekładni, 8 - okienko pozycji dźwigni, 9 - mechanizm pomiarowy, 10 - przełącznik zakresu, 11 - cylinder pomiarowy, 12 - pojemnik pomiarowy, 13 - pierścień z uchwytem, 14 - naczynie termostatujące, 15 - podziałka przyrządu mierniczego, 16 - miernik częstotliwości prądu, 17 - mechaniczna kompensacja zerowa, 18 – elektroniczna kompensacja zerowa, 19 - włącznik i wyłącznik napędu wrzeciona, 20 - włącznik mechanizmu pomiarowego [6]

Pomiar polegał na umieszczeniu płynu w pierścieniowej szczelinie pomiędzy dwoma współosiowymi cylindrami układu pomiarowego. Cylinder zewnętrzny jest nieruchomy natomiast wewnętrzny obraca się ze stałą prędkością kątową i jest połączony z wałem pomiarowym za pomocą kalibrowanej sprężyny. Pomiar wartości momentu obrotowego pozwala wyliczyć powstałe naprężenia ścinające i lepkość dynamiczną płynu przy danej szybkości ścinania [6].

3. Wyniki badań

Lepkość wyznaczona jest z zależności 1:

$$\eta = \frac{Tr}{Dr} \cdot 100 \% \quad (1)$$

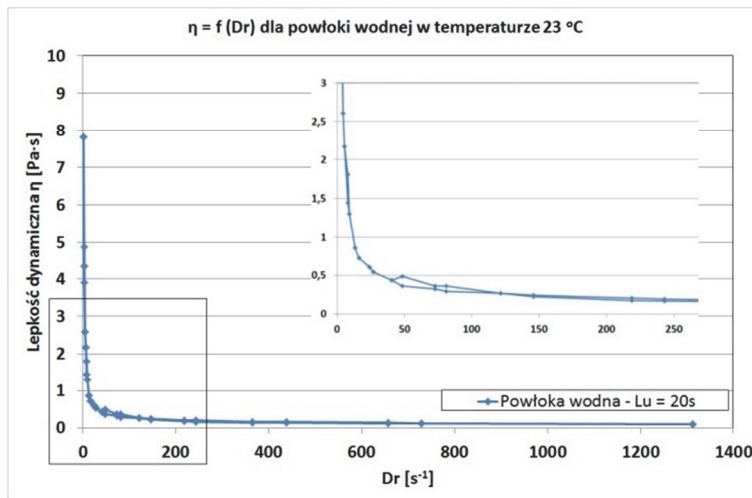
gdzie:

η - lepkość dynamiczna [P · s],

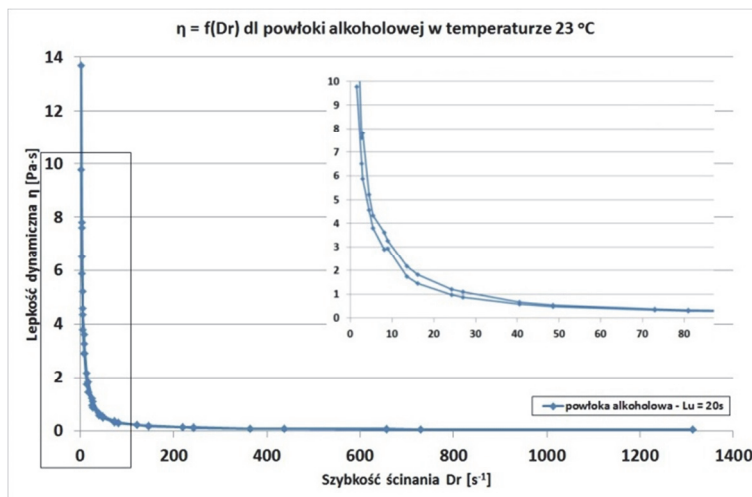
Tr - naprężenia ścinające [N/m²],

Dr - szybkość ścinania [s⁻¹].

Na rysunku 4 przedstawiono wykres wpływu szybkości ścinania na lepkość dynamiczną powłoki wodnej. Jest to tak zwana krzywa lepkości dynamicznej. Dla cieczy newtonowskich wraz ze wzrostem szybkości ścinania lepkość dynamiczna nie ulega zmianie. Na przedstawionym wykresie nie mamy takiej zależności, gdyż ze wzrostem szybkości ścinania lepkość ulega zmianie (maleje), co klasyfikuje wodną powłokę ochronną na ciecz z grupy nienewtonowskich. W przypadku alkoholowej powłoki ochronnej, występują takie same zależności (rys. 5), co również klasyfikuje je jako płyny nienewtonowskie.



Rys. 4. Wpływ szybkości ścinania na lepkość dynamiczną powłoki wodnej o lepkości umownej 20 sekund w temperaturze 23 °C



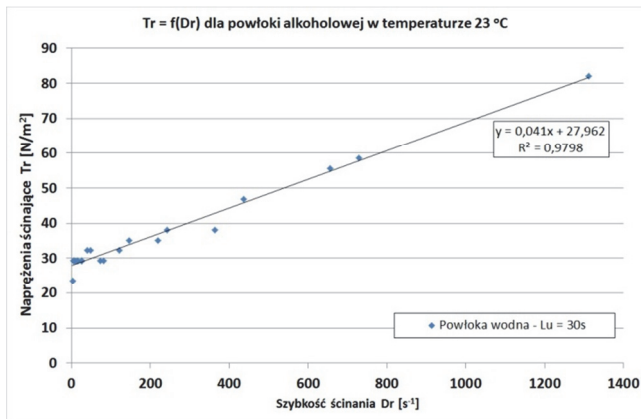
Rys. 5. Wpływ szybkości ścinania na lepkość dynamiczną powłoki alkoholowej o lepkości umownej 20 sekund w temperaturze 23 °C

Płyny nienewtonowskie możemy podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- płyny rozrzedzane i zagęszczane ścinaniem,
- płyny z granicą płynięcia.

Aby określić, do której z wyżej wymienionych grup należą powłoki ochronne należy wyznaczyć krzywą płynięcia, czyli zależność między naprężeniami ścinającymi Tr a szybkością ścinania Dr :

$$Tr = f(Dr) \quad (2)$$



Rys. 6. Wpływ szybkości ścinania na naprężenia ścinające, powłoka alkoholowa o lepkości umownej 30 sekund, temperatura 23 °C

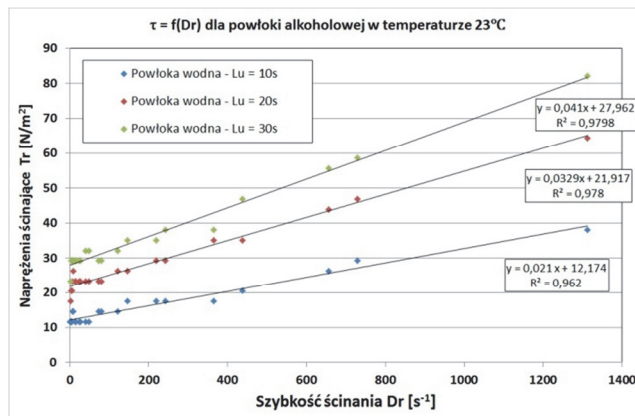
Na rysunku 6 przedstawiono krzywą płynięcia dla powłoki alkoholowej. Analizując wykres zauważyć można dwie charakterystyczne cechy. Po pierwsze, ze wzrostem szybkości ścinania rosną naprężenia ścinające. Po drugie, krzywa płynięcia nie przechodzi przez początek układu współrzędnych. Na podstawie tych dwóch cech możemy zakwalifikować powłoki alkoholowe do grupy płynów z granicą płynięcia. Dla tych płynów występuje pewne graniczne naprężenie – granica płynięcia, po przekroczeniu którego dopiero zaczynają płynąć. Przy małych naprężeniach płyny te zachowują się jak sprężyste ciała stałe. Materiały, które łączą cechy ciał stałych sprężystych i cieczy nazywamy płynami plastycznolepkimi. Ciała sprężyste cechują się tym, że pod wpływem naprężenia ulegają odkształceniu, a po usunięciu siły odkształcającej ciało wraca do pierwotnego kształtu. Podobnie zachowują się płyny plastycznolepkie, gdy oddziałujemy na nie małymi wartościami naprężeń. Dopiero w momencie przekroczenia naprężenia granicznego ciała te zaczynają płynąć. Płyny plastycznolepkie opisać możemy równaniem zwanym modelem Bingham'a [8]:

$$Tr = Tr_{gr} + \eta * Dr \quad (3)$$

gdzie:

- Tr – naprężenia ścinające $[N/m^2]$,
- Tr_{gr} – naprężenia ścinające graniczne $[N/m^2]$,
- Dr – szybkość ścinania $[s^{-1}]$,
- η – lepkość dynamiczna $[Pa*s]$.

Wyznaczając przy pomocy modelu Bingham'a krzywą trendu możemy z równania odczytać wartość lepkości dynamicznej.



Rys. 7. Wpływ szybkości ścinania na naprężenia ścinające, powłoka alkoholowa, temperatura 23 °C

Rysunek 7 przedstawia porównanie krzywych płynięcia dla powłoki alkoholowej o trzech wartościach lepkości umownej (10, 20 i 30 sekund). Dla wszystkich trzech lepkości umownych zależność między naprężeniami ścinającymi a szybkością ścinania opisano przy pomocy modelu Bingham'a, stąd lepkość dynamiczna dla powłoki alkoholowej o lepkości umownej $Lu = 10$ [s] wynosi $0,021$ $[Pa*s]$, dla $Lu = 20$ [s] – $0,033$ $[Pa*s]$, a dla $Lu = 30$ [s] – $0,041$ $[Pa*s]$.

Rysunek 8 przedstawia krzywą płynięcia dla powłoki wodnej o lepkości umownej $Lu = 20$ [s]. Analizując wykres można stwierdzić, że podobnie jak dla powłoki alkoholowej, w przypadku powłoki wodnej ze wzrostem szybkości ścinania rosną naprężenia ścinające i krzywa płynięcia nie przechodzi przez początek układu współrzędnych. W związku z tym możemy powłokę wodną zakwalifikować do cieczy plastycznolepkich. Zasadnicza różnica polega na tym, że krzywa płynięcia nie jest liniowa, czyli nie możemy jej opisać modelem Bingham'a. Do opisu tego rodzaju krzywych możemy posłużyć się modelem Herschela i Bulkleya [8]:

$$Tr = Tr_{gr} + (\eta * Dr)^{1/n} \quad (4)$$

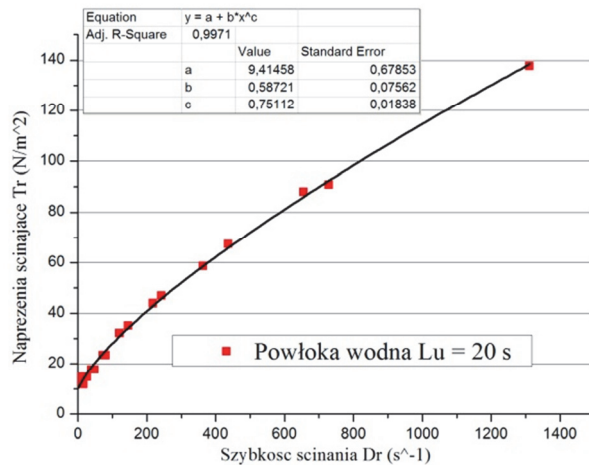
gdzie:

- Tr – naprężenia ścinające $[N/m^2]$,
- Tr_{gr} – naprężenia ścinające graniczne $[N/m^2]$,
- Dr – szybkość ścinania $[s^{-1}]$,
- η – lepkość dynamiczna $[Pa*s]$,
- n – współczynnik, $n > 1$ lub $n < 1$.

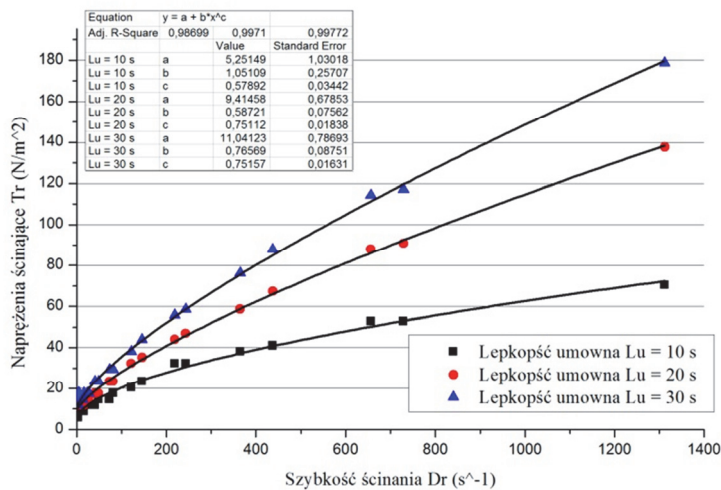
W przypadku tego modelu nie jest możliwe wyznaczenie z wykresu lepkości dynamicznej.

Na rysunku 9 przedstawiono porównanie krzywych płynięcia dla powłoki wodnej dla trzech wartości lepkości umownej wynoszących 10, 20 i 30 sekund. W przypadku powłoki wodnej z wykresu nie można wprost określić wartości lepkości dynamicznej. Krzywa na wykresie opisana jest równaniem:

$$y = a + b * x^c \quad (5)$$



Rys. 8. Wpływ szybkości ścinania na naprężenia ścinające, powłoka wodna o lepkości umownej 20 s, temperatura 23 °C



Rys. 9. Wpływ szybkości ścinania na naprężenia ścinające, powłoka wodna, temperatura 23 °C

czyli

$$Tr = Tr_{gr} + b * Dr^c \quad (6)$$

Stąd, aby wyznaczyć lepkość dynamiczną należy rozwiązać równanie:

$$b = \eta^c \quad (7)$$

gdzie:

η – lepkość dynamiczna [Pa*s]

b, c – parametry odczytane z wykresu

czyli

$$\eta = \sqrt[c]{b} \quad (8)$$

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań reologicznych wybranych powłok ochronnych wodnej i alkoholowej można wyciągnąć następujące wnioski:

- Wyznaczenie krzywej lepkości dynamicznej, czyli wpływu szybkości ścinania na lepkość dynamiczną powłoki, pozwala sklasyfikować powłoki pod względem właściwości reologicznych.
- W przypadku powłoki alkoholowej jak i wodnej lepkość dynamiczna ze wzrostem szybkości ścinania maleje, co klasyfikuje powłoki jako płyny nienewtonowskie.
- Wyznaczenie krzywych płynięcia, czyli zależności między naprężeniami ścinającymi a szybkością ścinania, pozwala określić do jakiego rodzaju płynów nienewtonowskich można zakwalifikować powłoki.

- W przypadku powłok alkoholowych jak i wodnych ze wzrostem szybkości ścinania, rosną naprężenia ścinające, a także krzywa płynięcia nie przechodzi przez początek układu współrzędnych, czyli możemy zakwalifikować powłoki do grupy płynów posiadających granicę płynięcia (ciecze plastycznolepkie).

Literatura

- [1] Jamrozowicz, Ł., Zych, J., Kolczyk, J. (2015). *The drying kinetics of protective coatings used on sand molds*. *Metalurgia* 2015, vol. 54, nr 1, 23÷26.
- [2] Lewandowski, J.L. (1997). *Tworzywa na formy odlewnicze*. Wydawnictwo Akapit, Kraków.
- [3] Wróbel, J. (2014). *Badania jakości cyrkonowych powłok ochronnych w aspekcie ich przydatności na formy i rdzenie piaskowe dla staliwa*. *Przegląd Odlewnictwa*, t. 64, nr 9-10, Kraków.
- [4] Jamrozowicz, Ł., Zych, J., Kolczyk, J., Wróblewski D. (2014). *Rola kształtu powierzchni formy w procesie wysychania wybranych powłok ochronnych*. *Archives of Foundry Engineering*, vol. 14, nr 2, 39÷44.
- [5] Seeger, K. (2012). Zastosowanie pokryć wodnych przy formowaniu ręcznym. *Przegląd Odlewnictwa*, Kraków, ISSN 0033-2275, nr 7-8 s. 322–326.
- [6] Instrukcja obsługi lepkościomierza rotacyjnego Rheotest 2.
- [7] Kolczyk, J, Zych, J. (2013). Rheological properties of ceramic slurries with colloidal binders used in the investment casting technology. *Metalurgia*, vol. 52 no.1, s. 55–58.
- [8] Kembłowski, Z. (1973). *Reometria płynów nienewtonowskich*. WNT Warszawa.
- [9] Gebhard Schramm, Haake GmbH (1998). *Reologia. Podstawy i zastosowania*. Ośrodek Wydawnictw Naukowych PAN. Poznań.
- [10] <http://www.wolfarb.pl/1.1-5-Laboratorium.html> (13.11.2015).
- [11] Dziubiński, M., Kiljański, T., Sęk, J. (2009). *Podstawy reologii i reometrii płynów*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź.

Podziękowania

Badania wykonano w ramach Grantu Dziekańskiego:
Nr 15.11.170.545.

Rheological Properties of Selected Coatings for Molds and Sand Cores

Abstract

The article presents the results of measurements of rheological testing of protective coatings: water and alcohol, for three contracts viscosities 10, 20 and 30 seconds. Research of dynamic viscosity were performed on a rotary viscometer Rheotest 2. As a result of measurements of the flow curves were tested and determined the dependence of shear rate viscosity, allowing to classify the rheological properties of coatings.