

Optymalizacja procesu odprężania wyrobów szklanych formowanych ręcznie w odprężarce komorowej elektrycznej

mgr inż. Magdalena Woźniak



Technolog w Zakładzie Doświadczalnym Oddziału Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Prowadzi badania nad syntezą szkielec foto-nicznych zawierających fazę metaliczną w postaci nanocząstek o zróżnicowanych kształtach. Zajmuje się również określeniem wpływu kształtu nanocząstek srebra i złota na barwę uzyskanych szkielec.

e-mail: m.wozniak@icimb.pl

MGR INŻ. MAGDALENA WOŹNIAK, MGR ALEKSANDRA SKOREK

INSTYTUT CERAMIKI I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH, ODDZIAŁ SZKŁA I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH W KRAKOWIE

WPROWADZENIE

Odprężanie szkła to proces technologiczny następujący po formowaniu szkła, którego celem jest takie studzenie wyrobu szklanego, by nie nastąpiło jego uszkodzenie bądź zniszczenie wskutek naprężeń występujących w szkielec.

Niska przewodność cieplna szkła powoduje, że w trakcie formowania wyrobów zewnętrzne warstwy masy szklanej, będące w bezpośrednim kontakcie z otoczeniem, stygną znacznie szybciej od warstw wewnętrznych. W rezultacie, wskutek skurczu warstw zewnętrznych, powstają w wyrobie szklanym silne naprężenia rozciągające, przy jednoczesnym działaniu sił ściskających w wewnętrznych warstwach szkła. Gdy wartość naprężeń przekracza wytrzymałość szkła, wówczas – w wyniku działania tych sił – następuje zniszczenie: pęknięcie wyrobu.

Powstające w szklanych przedmiotach naprężenia wewnętrzne mają charakter trwały lub przemijający. Usunięcie naprężeń trwałych jest możliwe, gdy lepkość szkła pozwala na dostatecznie szybki ruch cząstek w masie. Według danych literaturowych przyjmuje się, że lepkość szkła zapewniająca technologiczną relaksację trwałych naprężeń wewnętrznych zawiera się w zakresie od 10^{13} dPas do $10^{14.5}$ dPas [1]. Naprężenia przemijające powinny zaś ustąpić po wyrównaniu się temperatury zewnętrznych i wewnętrznych warstw szkła.

Analizując przebieg procesu odprężania wyrobów szklanych, możemy podzielić go na cztery stadia:

- ogrzewanie lub studzenie wyrobu do optymalnej temperatury odprężania,
- wygrzewanie wyrobu do tzw. optymalnej temperatury odprężania dla wyeliminowania naprężeń trwałych,
- powolne studzenie wyrobu do dolnej temperatury odprężania celem usunięcia naprężeń przemijających,
- szybkie studzenie wyrobów do temperatury otoczenia.

PROBLEMY Z ODPRĘŻANIEM SZKŁA ARTYSTYCZNEGO

W praktyce przemysłowej przy seryjnej produkcji wyrobów szklanych o powtarzalnym kształcie (np. słoiki, butelki, kieliszki, itp.) proces odprężania szkła prowadzony jest stosunkowo łatwo. Sytuacja komplikuje się w przypadku ręcznej produkcji wyrobów, gdy przedmioty o różnorodnym kształcie i wielkości wytwarzane są w krótkich seriach. Tego typu produkcja prowadzona jest w Centrum Szkła i Ceramiki, działającym przy krakowskim Oddziale Instytutu

STRESZCZENIE

Prowadzenie procesu odprężania szkła nie jest proste w sytuacji, gdy w zakładzie wytwarzane są przedmioty o różnorodnym kształcie i wielkości, ze szkła dmuchanego i szkła pełnego, w małych seriach. Taka produkcja wymaga zoptymalizowania procesu obróbki cieplnej (odprężania), ponieważ wyroby z pełnego szkła – takie jak galanteria szklana – przy zbyt wysokiej górnej temperaturze odprężania mogą ulegać deformacjom (są jeszcze plastyczne). Z kolei zbyt niska temperatura procesu nie pozwala na eliminację naprężeń wewnętrznych. W artykule przedstawiono, w jaki sposób wyniki badań naprężeń wewnętrznych przeprowadzonych dla kilku reprezentatywnych wyrobów produkowanych w krakowskim Oddziale Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych wpłynęły na zmianę prowadzenia procesu odprężania szkła.

SUMMARY

The optimization of the annealing process of hand formed glass in electric annealing furnace

Conducting of the glass annealing process is not an easy one in a situation when in a factory artefacts of different shapes and sizes are produced, from blown and from thick glass, in short series. This kind of production requires the optimization of annealing process because the artefacts from thick glass – glass animals, flowers, paperweights can be distorted due to too high upper annealing temperature. Excessively low upper annealing temperature, by contrast, precludes the release of interior stresses. The paper presents the results of interior stresses tests conducted for several representative artefacts produced in Kraków Division of Institute of Ceramics and Building Materials and shows how they influenced the conducting of the glass annealing process.

SŁOWA KLUCZOWE

szkło artystyczne, odprężanie, naprężenia wewnętrzne, odprężarka

KEYWORDS

artistic glass, annealing, interior stresses, annealing furnace

Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Powstają tu zarówno wyroby o cieńszych ściankach, np. karafki, patery, kufle, wazony, jak i grubościennie, z pełnego szkła, np. szklane zwierzątka (koty, ptaki, słonie), kwiaty (róże, narcyzy, kalie), czy też przyciski do papieru w formie pełnych, szklanych kul. Taka produkcja wymaga zoptymalizowania procesu obróbki cieplnej (odprężania), ponieważ wyroby z pełnego szkła przy zbyt wysokiej górnej temperaturze odprężania mogą ulegać deformacjom (są jeszcze plastyczne), z kolei zbyt niska temperatura procesu nie pozwoli na eliminację naprężeń wewnętrznych.

Jeśli chodzi o pierwsze stadium procesu odprężania, tj. studzenie lub ogrzewanie wyrobów po formowaniu, do temperatury odprężania to przyjmuje się, że czas stygnięcia wyrobu wynosi 3,5–2°C na sekundę w trakcie transportu do komory odprężarki [2]. Wkładanie zbyt przestudzonych przedmiotów na półkę odprężarki komorowej powoduje konieczność szybkiego nagrzewania do optymalnej temperatury odprężania, zaś odnośnienie do odprężarki przedmiotu o zbyt wysokiej temperaturze może prowadzić do jego deformacji. W związku z tym najkorzystniej jest, gdy temperatura wyrobów jest zbliżona do optymalnej temperatury odprężania – wówczas ciepło wnoszone wraz z gorącym wyrobem poprawia również bilans cieplny odprężarki i powoduje zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Z uwagi na konieczność otwierania drzwi odprężarki w trakcie wkładania kolejnych przedmiotów do odprężania czynność ta powinna być wykonywana sprawnie i bez niepotrzebnej zwłoki.

W trakcie drugiego etapu odprężania, tj. wygrzewania wyrobu w optymalnej temperaturze odprężania, czas wygrzewania powinien wynosić:

$$\text{Czas} = 150 a^2 / \text{min}$$

gdzie a = połowa grubości ścianki wyrobu [2].

W przypadku wyrobów takich jak patery, karafki, dzbanki, kufle maksymalna grubość ścianki to około 8 mm, minimalna – 4 mm. Czas wygrzewania w górnej temperaturze odprężania wyniesie więc:

$$150 \times 0,4^2 = 150 \times 0,16 = 24 \text{ minuty.}$$

Przy wyrobach z pełnego szkła czas ten będzie zdecydowanie dłuższy.

Powolne studzenie szklanych przedmiotów do temperatury poniżej dolnej temperatury odprężania, trzeci etap procesu odprężania, powinno być prowadzone z szybkością od 0,5°C na minutę do maksymalnie 2,0°C na minutę, przy czym przyjmuje się, że temperatura dolna odprężania jest o max. 150°C niższa od temperatury górnej odprężania [2].

Ostatnim stadium procesu odprężania wyrobów jest szybkie studzenie ich do temperatury otoczenia. W odprężarkach tunelowych stosuje się często wymuszone studzenie z użyciem wentylatorów. Stosowana w Centrum Szkła i Ceramiki elektryczna odprężarka komorowa nie posiada systemu szybkiego studzenia, dlatego proces dalszego obniżania temperatury jest samoczynny. Jest to korzystne z tego względu, iż bardzo szybkie studzenie szklanych wyrobów mogłoby doprowadzić do wystąpienia szoku termicznego (zbyt duża różnica między temperaturą wyrobów i temperaturą otoczenia), co w przypadku przekroczenia granicy wytrzymałości szkła skutkowałoby ich samoczynnym pęknięciem.

W Centrum Szkła i Ceramiki przeprowadzono badania zmierzające do optymalizacji i takiego doboru parametrów technicznych odprężania przy użyciu odprężarki komorowej elektrycznej, aby pozostałe w wyrobach szklanych naprężenia wewnętrzne były jak najmniejsze.

ANALIZA ROZMIESZCZENIA ELEMENTÓW GRZEJNYCH W ODPRĘZARCE KOMOROWEJ

Odprężarka komorowa elektryczna stosowana do odprężania wyrobów szklanych w Centrum Szkła i Ceramiki posiada następującą



Fot. 1. Podest hutniczy w Centrum Szkła i Ceramiki w krakowskim Oddziale Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Widoczne dwie odprężarki komorowe (1, 2).

budowę: trzon komory odprężarki wykonany jest z prostki izolacyjnej LPC 4 i L6s oraz z płytek Ermoldu, ściany boczne z prostki izolacyjnej L6s oraz płyt Promasil 1000, sklepienie także z płyt izolacyjnych Promasil 1000. Drzwi zamykane zamkiem ryglowym zbudowano z płyt izolacyjnych Promaform 1230. Całość spięto konstrukcją stalową o wymiarach zewnętrznych: szer. 1050 mm, gł. 1200 mm, wys. 1950 mm. Wymiary komory wewnętrznej odprężarki wynoszą odpowiednio: 600 mm × 800 mm × 700 mm, co daje objętość komory około 300 dcm³.

Odprężarka ogrzewana jest poprzez elementy grzejne umieszczone w ścianach: bocznych i tylnej oraz w trzonie odprężarki (dno). Łącznie zainstalowanych jest 16 elementów z drutu oporowego (kanthal) – spiral nawiniętych na ceramiczne rurki. Odległości pomiędzy kolejnymi elementami grzejnymi wynoszą 15 cm. Każda grzałka posiada moc 900 W, a cała odprężarka dysponuje mocą 15 kW. Równomierne rozmieszczenie elementów grzejnych gwarantuje dobry rozkład temperatury w komorze urządzenia. Do pomiaru i sterowania temperaturą wykorzystano czujnik temperatury NiCr-NiAl o zakresie pracy 40–900°C. Regulacja temperatury prowadzona jest z użyciem sterownika firmy Limatherm Sensor zamontowanego na panelu sterowania typu LIM N1100, z podwójnym wyświetlaczem temperatury LED o dokładności +/- 0,25%. Grzałki są osłonięte siatką ochronną uniemożliwiającą ich dotknięcie w trakcie wkładania wyrobów do odprężarki. Wewnętrzna półka z blachy stalowej o grubości 6,5 mm zaopatrzona jest w wycięcia podłużne pozwalające na swobodny przepływ (cyrkulację) powietrza i, tym samym, wyrównywanie temperatur pomiędzy dolną a środkową półką komory odprężalniczej.

Dla sprawdzenia rozkładu temperatury w komorze odprężarki wykonano serię pomiarów temperatury, wykorzystując przenośną termoparę prętową z czujnikiem cyfrowym. Badanie przeprowadzono w rogach komory oraz na dolnej i górnej półce. Wyniki pomiarów potwierdziły równomierność rozkładu temperatury w stosunku do tej wskazywanej przez stały termoelement. Różnica temperatur wynosiła 5–7°C, co jest wartością dopuszczalną. Odnotowano też różnicę temperatur z przodu komory przy drzwiach odprężarki, co jest związane z otwieraniem drzwi podczas wkładania wyrobów do odprężania. Tutaj różnica temperatur dochodziła do 16–20°C, jednakże wyroby szklane nie są układane przy samej krawędzi półki, tylko nieco głębiej – tam, gdzie różnica wskazań nie przekraczała 10°C. Badanie rozkładu temperatur potwierdziło więc wynik dopuszczalny w warunkach przemysłowych.

BADANIA NAPRĘŻEŃ WEWNĘTRZNYCH W ARTYSTYCZNYCH WYROBACH SZKLANYCH

Formowane ręcznie wyroby szklane posiadają bardzo różnorodny kształt i wielkość, dlatego zdecydowano się na wybranie kilku



Fot. 2. Odprężarka komorowa elektryczna, Centrum Szkła i Ceramiki.



Fot. 3. Kubeczek szklany produkowany w Centrum Szkła i Ceramiki w krakowskim Oddziale Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.

wzorów reprezentatywnych dla produkowanych wyrobów. Spośród wielu rodzajów wyrobów wybrano patere, kubeczek, wazon i figurkę kota. Badania naprężeń wewnętrznych w szkle przeprowadza się wykorzystując metodę elastoptyczną, opartą na zjawisku wymuszonej dwójłomności [4]. Wykonano je w Zakładzie Technologii Szkła krakowskiego Oddziału Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych przy użyciu polaryskopo-polarymetru PKS-250 w oparciu o metodykę zawartą w normie PN-67/S-13065 [3]. Wyniki tych badań zestawiono w tabeli nr 1.

Tab. 1. Pomiar naprężeń wewnętrznych wyrobów szklanych.

L.p.	Nazwa wyrobu	Wielkość naprężeń
1.	Patere o symbolu M-51	25 nm/cm (przy obrzeżu)
2.	Kubeczek	16 nm/cm (przy dnie)
3.	Wazon o symbolu W-107	0 nm/cm (przy dnie)

Badanie naprężeń wewnętrznych w szklanej figurce kota okazało się być niemiernodajne ze względu na skomplikowany, zróżnicowany kształt obiektu. Duża niepewność pomiaru nie pozwoliła na uzyskanie wiarygodnych wyników.

Jednocześnie przeprowadzono analizę krzywej odprężania, która ukazuje, jak w ciągu doby obniża się temperatura w odprężarce komorowej, po wyłączeniu jej po skończonej pracy (tabela nr 2).

WYZNACZANIE GÓRNEJ I DOLNEJ TEMPERATURY ODPRĘŻANIA WYROBÓW ZE SZKŁA ARTYSTYCZNEGO

Dla wyznaczenia górnej i dolnej temperatury odprężania szkła artystycznego postanowiono zastosować metodę dylatometryczną. W tym celu ze szkła płynnego wyciągnięto pręty szklane o średnicy około 4–6 mm i długości około 200 mm, a z prętów tych przygotowano beleczkę szklaną do dylatometru. Przeprowadzono pomiar rozszerzalności cieplnej szkła przy użyciu dylatometru typ 802 L firmy BaHr – Thermoanalyse GmbH (Szwajcaria). Pomiar przeprowadzono w Zakładzie Technologii Szkła ICiMB w Krakowie. W oparciu o krzywą dylatometryczną wyznaczono styczne i w punkcie ich przecięcia określono górną temperaturę odprężania.

Analizując wyniki z wykonanych badań stwierdzono, że stosowane do tej pory parametry techniczne procesu odprężania, tj. temperatury i czasy odprężania wymagają wprowadzenia niewielkich korekt w zakresie górnej temperatury odprężania. Stosowana temperatura górna 485°C została zmieniona na wartość 475°C. Analiza czasów odprężania wskazała ponadto, że zarówno czas wygrzewania, obniżania temperatury do dolnej granicy odprężania, jak



Fot. 4. Kubeczek szklany – widok w świetle spolaryzowanym w trakcie badania polaryskopo-polarymetrem PKS-250.



Fot. 5. Szklana figurka kota produkowana w Centrum Szkła i Ceramiki w krakowskim Oddziale Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych.



Fot. 6. Figurka – widok w świetle spolaryzowanym w trakcie badania polaryskopo-polarymetrem PKS-250.

Tab. 2. Krzywa odprężania wyrobów szklanych w odprężarce komorowej nr 1.

Godzina od momentu wyłączenia odprężarki)			Godzina od momentu wyłączenia odprężarki)		
Lp.	Temp.		Lp.	Temp.	
1.	1	484°C	25.	13	268°C
2.	1,5	482°C	26.	13,5	261°C
3.	2	475°C	27.	14	253°C
4.	2,5	459°C	28.	14,5	246°C
5.	3	446°C	29.	15	240°C
6.	3,5	434°C	30.	15,5	235°C
7.	4	422°C	31.	16	229°C
8.	4,5	411°C	32.	16,5	223°C
9.	5	401°C	33.	17	218°C
10.	5,5	391°C	34.	17,5	212°C
11.	6	381°C	35.	18	207°C
12.	6,5	372°C	36.	18,5	202°C
13.	7	364°C	37.	19	197°C
14.	7,5	355°C	38.	19,5	193°C
15.	8	346°C	39.	20	189°C
16.	8,5	338°C	40.	20,5	183°C
17.	9	329°C	41.	21	179°C
18.	9,5	321°C	42.	21,5	175°C
19.	10	313°C	43.	22	171°C
20.	10,5	305°C	44.	22,5	167°C
21.	11	297°C	45.	23	164°C
22.	11,5	291°C	46.	23,5	161°C
23.	12	283°C	47.	24	157°C
24.	12,5	276°C	48.	24,5	154°C

i szybkiego studzenia nie wymagają żadnych zmian, gdyż z dużym zapasem spełniają wymagania techniczne. Można stwierdzić, że czas szybkiego studzenia wyrobów jest zbyt długi, lecz aby nie doprowadzić do szoku temperaturowego przy wyjmowaniu wyrobów postanowiono pozostawić ten parametr bez zmian, tym bardziej, że Centrum Szkła i Ceramiki dysponuje dwiema odprężarkami pracującymi naprzemiennie w kolejne dni.

BADANIA NAPRĘŻEŃ W WYROBACH SZKLANYCH PO ZASTOSOWANIU ZOPTYMALIZOWANYCH PARAMETRÓW PROCESU

W wyniku prowadzonych prac badawczych ustalona górna temperatura odprężania wyrobów ze szkła artystycznego została wprowadzona na sterownikach szaf sterujących odprężarek komorowych, Limatherm Sensor. Dla zbadania rezultatów wprowadzonych zmian wyroby odprężono przy zmodyfikowanych warunkach termicznych, a następnie przeprowadzono badanie naprężeń.

W tabeli nr 4 zamieszczono wyniki badania naprężeń wewnętrznych tych samych rodzajów wyrobów po zastosowaniu korekty temperatur odprężania.

WNIOSKI

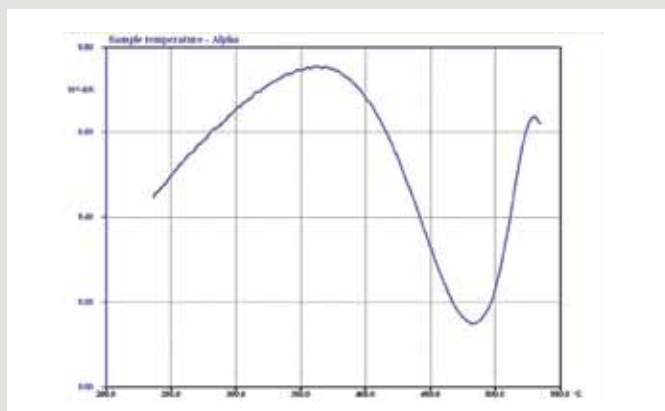
Analiza wyników zamieszczonych w tabelach 1 i 4 wskazuje, że dobre parametry procesu odprężania wyrobów uzyskuje się przy zastosowaniu niższej górnej temperatury odprężania. Stosowaną górną temperaturę (485°C) zastąpiono temperaturą 475°C, która okazała się wystarczająca dla poprawnego przebiegu procesu odprężania szkła. To działanie spowodowało również oszczędność energii elektrycznej zużywanej przez odprężarki elektryczne. Dla obu odprężarek stosowanych w Centrum Szkła i Ceramiki wprowadzono zoptymalizowane parametry procesu odprężania, programując na sterownikach tych urządzeń nowe nastawy temperatur.



Wykres nr 1. Krzywa odprężania wyrobów szklanych w odprężarce komorowej nr 1.

Tab. 3. Wartości liniowych współczynników rozszerzalności cieplnej szkła artystycznego.

α_{20-300}	$83,3 \cdot 10^{-7} [K^{-1}]$
α_{20-400}	$85,6 \cdot 10^{-7} [K^{-1}]$
α_{20-500}	$87,3 \cdot 10^{-7} [K^{-1}]$
α_{20-600}	$88,7 \cdot 10^{-7} [K^{-1}]$



Wykres nr 2. W oparciu o krzywą dylatometryczną określono górną temperaturę odprężania.

Tab. 4. Pomiar naprężeń wewnętrznych wyrobów szklanych po obniżeniu górnej temperatury odprężania.

Lp.	Nazwa wyrobu	Wielkość naprężeń
1.	Patera o symbolu M-51	23 nm/cm (przy obrzeżu)
2.	Kubeczek	15 nm/cm (przy dnie)
3.	Wazon o symbolu W-107	0 nm/cm (przy dnie)

LITERATURA

- [1] Ciecińska M., *Naprężenia w szkłe*, „Świat Szkła”, 12/2004, 52–55
- [2] Płoński I. (red., 1972), *Technologia szkła*, Warszawa
- [3] PN-67/S-13065, *Szkło i wyroby szklane. Pomiar naprężeń*
- [4] Marczevska A., Kuśnierz A., (2014), *Badania naprężeń w szkłe*, [w:] *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Przemysł Szklarski 2014*, Katowice, 67–81