

Sklejanie elementów optycznych

Cele klejenia

- „jednorodność” układu optycznego,
- eliminacja zjawiska częściowego odbicia (dopasowanie współczynnika załamania kleju do współczynnika załamania elementów optycznych, np. soczewki),
- łączenie elementów optycznych ze sobą oraz z oprawami, obudowami itp.
- Kleje tymczasowe

Podstawowe kleje

- balsam jodłowy,
- balsamin,
- kleje UV-utwardzalne,
- inne.

Podstawowe kleje

- Zagęszczanie rozpuszczalnika (np.. Balsam jodłowy)
 - Dużą lepkość, utwardzane przez eliminację rozpuszczalnika w celu osiągnięcia współczynnika załamania ~ 1.53
 - Rzadko stosowane w precyzyjnych układach optycznych
- Termoplastyczne (np.. Cellulose carbate, $n \sim 1,48$)
 - bezbarwne lub lekkobarwne substancje stałe, które rozpuszczają się w temperaturze około 120°
 - Zaleta: sklejone elementy można rozdzielić pod wpływem ciepła, co jest łatwe i nie ma ryzyka zniszczenia elementów
- Termoutwardzalne
 - Kleje dwuczęściowe, które mogą być utwardzane w temp. Pokojowej po dodaniu odpowiedniego katalizatora
 - Czas utwardzania spoiwa około 37 dni można skrócić do kilku godzin poprzez lekkie podwyższenie temperatury (zwykle 70°)
 - Summer's C-59, M-69, F-65, RD3 to 74, Lens Bond's, and Kodak's Eastman HE-80 ($n \sim 1.55$)

Podstawowe kleje

- Fotoutwardzalne
 - Zwykle jednocześciowe, utwardzane przez ekspozycję światła UV o długości fali 250 do 380 nm.
 - Sklejanie lekkich elementów posiadających przepuszczalność fali e-m w podanym zakresie
 - Grubość kleju musi być mała, by uniknąć naprężeń powstałych podczas kurczenia
 - Norland's NOA-61 ($n = 1.56$) , Summer's UV-69 ($n = 1.55$) ,UV-74 oraz inne
 - Proces klejenia jest dwuetapowy: krótka ekspozycja na 20 sekund, a następnie długa ekspozycja do 60 minut.
 - Cały obszar klejenia musi podlegać naświetlaniu UV, by uzyskać jednolicie utwardzoną powierzchnię
 - Wytrzymałość łącza można poprawić przez ogrzewanie sklejonnych elementów

- Klejenie soczewek, dubletów, trypletów, zespołów składających się z wielu soczewek
- Klejenie pryzmatów, układów pryzmatów z filtrem
- Klejenie pryzmatycznych dzielników wiązki
- Klejenie elementów barwnych
- Klejenie układów soczewek z pryzmatami
- Klejenie tworzywami fotoutwardzalnymi
- Spajanie elementów optycznych z różnymi typami metali
- „Uszczelnianie: kontaktu pomiędzy zespołami z użyciem żywicy
- Klejenie reflektorów narożnych
- Klejenie folii polaryzacyjnych między płaszczyznami elementów optycznych
- Polaryzacyjne dzielniki wiązki

Wybór kleju

- Aspekt optyczny
 - Współczynniki załamania łączonych elementów
 - Przepuszczalność powierzchni
 - Tolerancja absorpcji i wewnętrznego odbicia
- Aspekt fizyczny
 - Grubość i promień krzywizny elementów
 - czy będzie późniejsza obróbka mechaniczna (cięcie, szlifowanie)
 - Rodzaje materiałów które mają być połączone
 - Współczynnik rozszerzalności cieplnej
 - Położenie linii wzdłuż których będą połączone elementy
 - Wielkość powierzchni a lepkość kleiwa
- Warunki środowiskowe
 - Skrajne temperatury pracy
 - Wymagania mechaniczne
 - Odporność chemiczna
 - Możliwość rozklejenia elementów optycznych.

- Właściwości przed procesem utwardzania
 - Okres przydatności do użycia
 - Czas „żywności”
 - Lepkość (naprężenia ścinające, opory przepływu)
 - Zwilżanie
- Właściwości procesu utwardzania (temperatura, czas, odgazowanie, skurcz po utwardzeniu)
- Właściwości optyczne (transmitancja, barwienie, osłabienie wiązki, współczynnik załamania, fresnelowskie odbicia)
- Właściwości mechaniczne (moduł younga, współczynniki Poissona, moduł sprężystości, twardość, wytrzymałość, granica wytrzymałości, przyczepność)
- Właściwości termiczne (zakres pracy, temperatura zeszklenia, współczynnik rozszerzalności cieplnej, możliwość „pełzania”)
- Właściwości chemiczne (odporność na rozpuszczalniki chemiczne)

Sklejanie balsamem jodłowym

- *Balsam jodłowy* – żywica z jodły kanadyjskiej, pospolitej, syberyjskiej, kaukaskiej i amurskiej (odmienne zbiory żywicy jodłowej od zbiorów żywicy sosnowej), gromadząca się pod korą jodły w komórkach tworzących naarosty i wzdęcia
- Charakteryzuje się współczynnikiem załamania światła identycznym lub bardzo zbliżonym do wielu gatunków szkła optycznego
- Spoina charakteryzuje się niewielką wytrzymałością cieplną, a jej utworzenie wymaga względnie długiego czasu.
- Stosuje się: mikroskopii optycznej do klejenia preparatów oraz do utrwalania cienkich szlifów mineralnych w badaniach minerałów.
- Rozpuszcza się w ksylenie, toluenie, benzenie i innych rozpuszczalnikach organicznych, w zetknięciu z powietrzem stopniowo gęstnieje aż do stwardnienia.

Sklejanie balsamem jodłowym

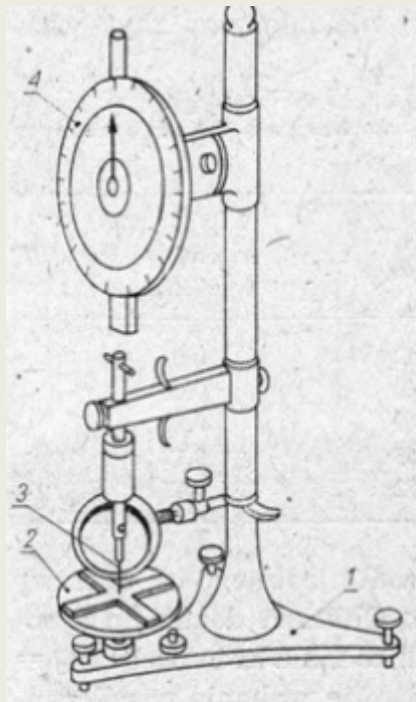
- *Właściwości żywicy jodłowej* – lepka i przezroczysta ciecz o żółtawo-zielonkawym kolorze i specyficznym zapachu,
- zawiera ok. 30% terpentyny jodłowej, którą można całkowicie oddestylować,
- nie zmienia się i nie krystalizuje przy obniżeniu temperatury do -5°C oraz podczas dłuższego przechowywania w zamkniętym naczyniu
- dodanie nieznacznych ilości wody powoduje mętnienie

Sklejanie balsamem jodłowym

- *Przeróbka żywicy na balsam*- pierwszy etap, usuwanie zanieczyszczeń:
 - rozpuszczanie w eterze,
 - dodawanie wody destylowanej w celu wytworzenia emulsji,
 - miareczkowanie roztworem 0.1n NaOH z dodatkiem oranżu metylowego,
 - wtórne płukanie eterem i wodą destylowaną,
 - proces powtarzany 2÷3 razy w ciągu doby,
 - odkwaszony roztwór rozcieńcza się eterem i potem odwadnia, filtrując roztwór przez odpowiednie filtry papierowe
- *Zagęszczanie żywicy* :
 - cel: odparowanie eteru oraz terpentyny znajdujących się w żywicy,
 - temperatura ok. 60°C oraz ciśnienie ok. 16kPa,
 - sposób działania: odessanie (pompy próżniowe) niepożądanych składników wskutek wydzielenia się ich przy ustalonych warunkach,
 - czas trwania procesu: 1-2h,
 - powtórzenie procesu przy bardziej rygorystycznych warunkach: 170°C i p=0.5kPa, czas trwania ok. 35min.
 - efektywność procesu: 100g żywicy → 60g balsamu

Sklejanie balsmem jodłowym

- *Pomiar twardości balsamu* – penetrometr Richardsona (rys.)
 - istota pomiaru: im bardziej miękki jest balsam tym bardziej igła penetrometru wnika w balsam,
 - podgrzany balsam wlewa się do mosiężnych naczyń, a następnie chłodzi do temperatury pokojowej,
- czas trwania zanurzania igły: 1min.,

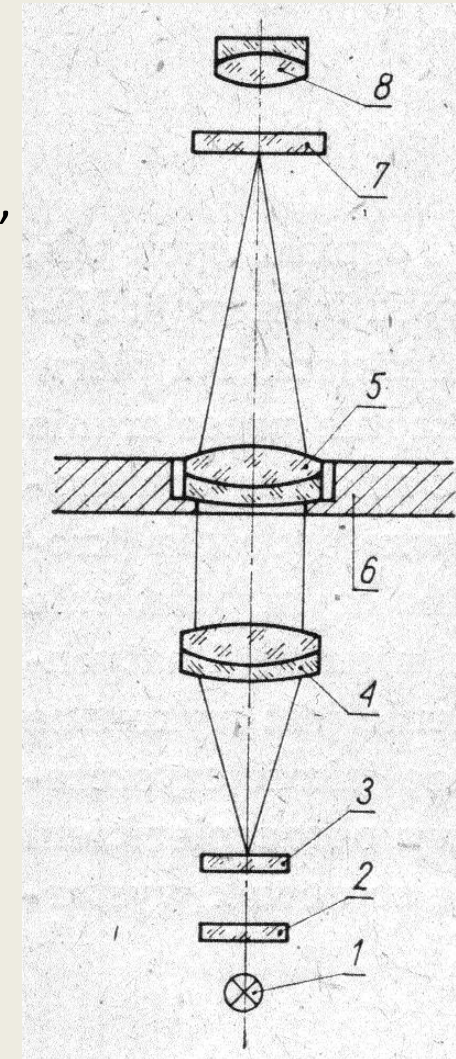


Sklejanie balsamem jodłowym

- *Właściwości balsamu:*
 - współczynnik załamania $1.52 \div 1.54$,
 - dyspersja 0.013,
 - współczynnik rozszerzalności liniowej zmienny od $0.5 \cdot 10^{-4}$ do $2.3 \cdot 10^{-4}$ ($7 \div 30$ razy większy niż łączonych szkieł),
- Całkowita niezdolność do krystalizacji, stała przezroczystość, mała zmiana objętości przy krzepnięciu
- Istotne jest: wytrzymałość na mrożenie i nagrzewanie
- Wada (?): w znacznym stopniu pochłania ultrafiolet.

Sklejanie balsamem jodłowym

- *Proces sklejania elementów optycznych balsamem*
 - oczyszczenie powierzchni sklejanych (spirytus, eter),
 - nagrzewanie pary szkieł do temperatury ok. 150°C,
 - wprowadzenie między sklepane powierzchnie kropli balsamu,
 - wyciskanie nadmiaru balsamu,
 - centrowanie soczewek (rys.)
 - chłodzenie układu soczewek,
 - odprężanie sklejonych elementów w termostatach w temperaturze ok. 50°C (4÷5h),
 - kontrola jakości po usunięciu niepożądanych fragmentów balsamu i oczyszczeniu układu (czystość warstwy balsamu, czystość zewnętrznych powierzchni krzywizny soczewek oraz wady materiałów, grubość, ogniskowa układu, centryczność sklejonych soczewek, powierzchnie soczewek)



Sklejanie balsaminem

- *Balsamin* – tworzywo sztuczne, klej karbinolowy
- *Dlaczego?* Balsam jodłowy ma stosunkowo małą odporność termiczną i mechaniczną, ponadto raz sklejonych elementów optycznych nie można rozkleić.
- *Sposób otrzymywania* – kondensacja winyloacetyleny z acetonem w obecności wodorotlenku potasu w postaci proszku.
- *Właściwości* – współczynnik załamania 1.50
- *Zalety* – możliwość rozklejenia, gdy proces sklejania się nie uda
- Rozklejanie:
 - Młotek
 - Ciepło
 - Zimno

Tablica 3.7. Klasyfikacja klejów wg BN-71/5510-04

Podział	Oznaczenie	Blizsze określenie	Podstawowe składniki	Przykłady zastosowania
Kleje naturalne	Balsam 200	balsam jodłowy o penetracji 200° Richardsona	żywica jodłowa	sklejanie elementów obiektywów mikroskopowych; sklejanie elementów okularów mikroskopowych; sklejanie elementów podobnych
	Balsam 60	balsam jodłowy o penetracji 60° Richardsona		sklejanie elementów obiektywów fotograficznych, powiększalnikowych, lunetowych i podobnych
	Balsam 60P	balsam jodłowy o penetracji 60° Richardsona, plastyfikowany	żywica jodłowa klej lniany	sklejanie płytek ogniskowych z warstwą emulsji kolodionowej i kleju rybiego oraz płytek ogniskowych retuszowanych
Kleje syntetyczne	Balsamin	klej karbinolowy	dwumetylowinyloetynylokarbinol (karbinol) nadtlenek benzoilu	sklejanie obiektywów i układów odwracających przyrządów lunetowych i podobnych oraz przyrządów średniej wielkości
	KBMS	klej polimetakrylowy	metakrylan metylu metakrylan butylu ksylol nadtlenek benzoilu	sklejanie klinów wzorcowych do interferometrów (dwójłomnych); sklejanie filtrów świetlnych z warstwą poliwinylową lub żelatynową; sklejanie soczewek o średnicy 30 mm, gdzie dopuszczalne jest niepełne wysychanie kleju; sklejanie polaroidów i elementów falowych
	KAS	klej poliestrowy	żywica poliestrowa katalizator HCH naftenian kobaltu	sklejanie elementów, w których wymagane są małe naprężenia i odkształcenia; sklejanie elementów o dużych średnicach sklejanie elementów walcowych sklejanie elementów pracujących w podwyższonych temperaturach
	ETD	klej epoksydowy	żywica epoksydowa tiokol ciekły amina alifatyczna	sklejanie elementów szklanych z metaplexem
	OK 50	klej epoksydowy	żywica epoksydowa amina alifatyczna	sklejanie wszystkich elementów optycznych pracujących w klimacie tropikalnym oraz narażonych na działanie morskiej wody

OK 50 ETD KAS KBMS BALSAMIN BALSAM

Twardość	Czystość	Zmiany fizykochemiczne w czasie	Odporność na rozpuszczalniki organiczne	Rozpuszczalność	Zakres temperatur stosowania klejów °C	Odporność na działanie klimatu tropikalnego	Wytrzymałość mechaniczna na rozzerwanie, MPa	Naprężenia
penetracja 200 ÷ 250° Richardsona	optycznie czysty	nie występują	klej rozpuszczalnikowy nieodporny na rozpuszczalniki organiczne		-40 ÷ +40	nieodporny	—	średnie
penetracja 200 ÷ 250° Richardsona								duże
								średnie
13HBr	optycznie czysty	zmienia zabarwienie na żółto-czerwone	eter naftowy, benzyna	eter etylowy, aceton, chloroform, alkohol etylowy	-40 ÷ +60	pleśnioodporny, odporny na wodę morską	6 ÷ 8	duże
—		nie występują	klej rozpuszczalnikowy nieodporny na rozpuszczalniki organiczne		-50 ÷ +50	—	ok. 10	bardzo małe
24HBr		nie występują	eter naftowy, alkohol etylowy	ketony, chloroform	-40 ÷ +80	pleśnioodporny, odporny na wodę morską	4	małe
7,5 HBr		zmienia zabarwienie na czerwone	eter naftowy, benzyna	eter etylowy, aceton, chloroform, alkohol etylowy	-50 ÷ +60	pleśnioodporny, odporny na wodę morską	27	bardzo małe
27HBr		nie występują	eter naftowy, eter etylowy, chloroform, benzyna	aceton, alkohol etylowy	-50 ÷ +60	odporny na wodę morską	10	średnie

Klejenie elementów optycznych z kryształów

- Klejenie pryzmatów polaryzacyjnych wymaga klei o innym współczynniku załamania niż balsam ($1 \div 1,658$) w zależności od rodzaju pryzmatu
- Przykład
 - Olej lniany, $n=1,486$
 - Olej makowy, $n=1,478$

Klejenie filtrów

- Filtry barwne:
 - Warstwa żelatyny pomiędzy dwie płytki szklane i łączy się za pomocą balsamu
 - Temperatura procesu sklejenia nie wyższa niż $40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Filtry polaryzacyjne: warstwa winylitu lub lakieru

Kleje fotoutwardzalne

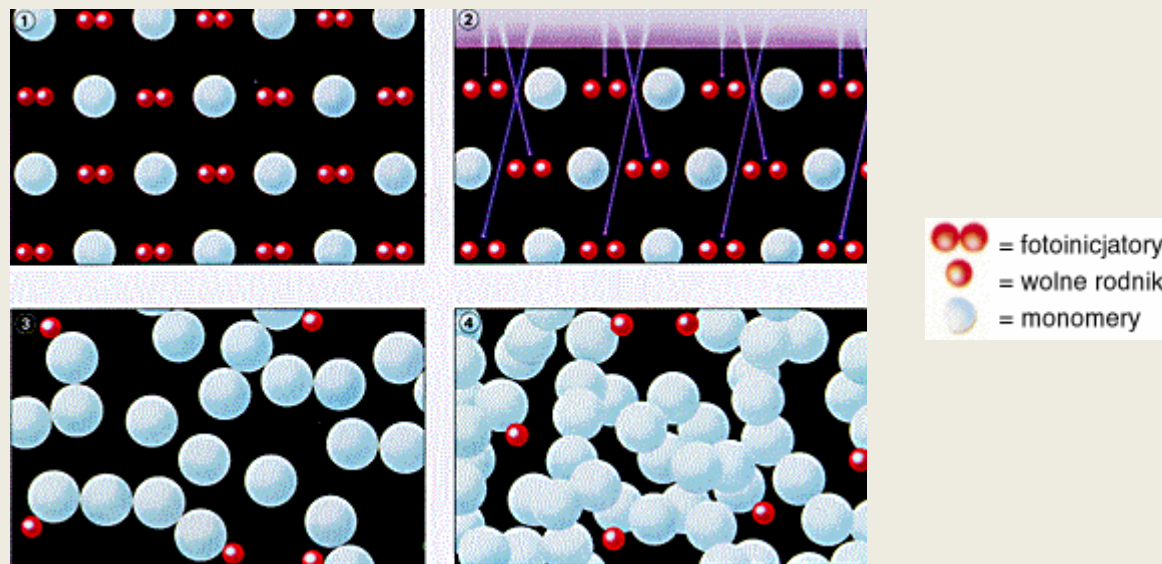
- Kopolimery uretanowe, kopolimery na bazie poliestrów
- Kleje poliuretanowe: adhezja, duża wytrzymałość, doskonałe właściwości mechaniczne, wykazuje dużą odporność na czynniki biologiczne, środki chemiczne oraz wodę
- Może tworzyć estetyczne, całkowicie przezroczyste i bezbarwne spoiny.
- Odporny na działanie wody, pary i wielu chemikaliów.

Kleje fotoutwardzalne

- <http://loctite.fast.de/wwdh/pl/book/i024ch02.htm>
- Czas utwardzania tych klejów zależy od natężenia i długości fal światła UV. Dlatego prawidłowa polimeryzacja wymaga zawsze doboru źródła promieniowania UV do danego produktu.
- Promieniowanie UV powoduje rozszczepianie fotoinicjatorów. Z kolei tak powstałe wolne rodniki rozpoczynają polimeryzację. Systemy Loctite do utwardzania światłem UV dysponują widmem optymalnym dla produktów Loctite.
- Procesy utwardzania UV dzieli się na trzy rodzaje:
 - * utwardzanie wskrośne przez promieniowanie UV
 - * utwardzanie powierzchniowe przez promieniowanie UV
 - * wtórne systemy utwardzania

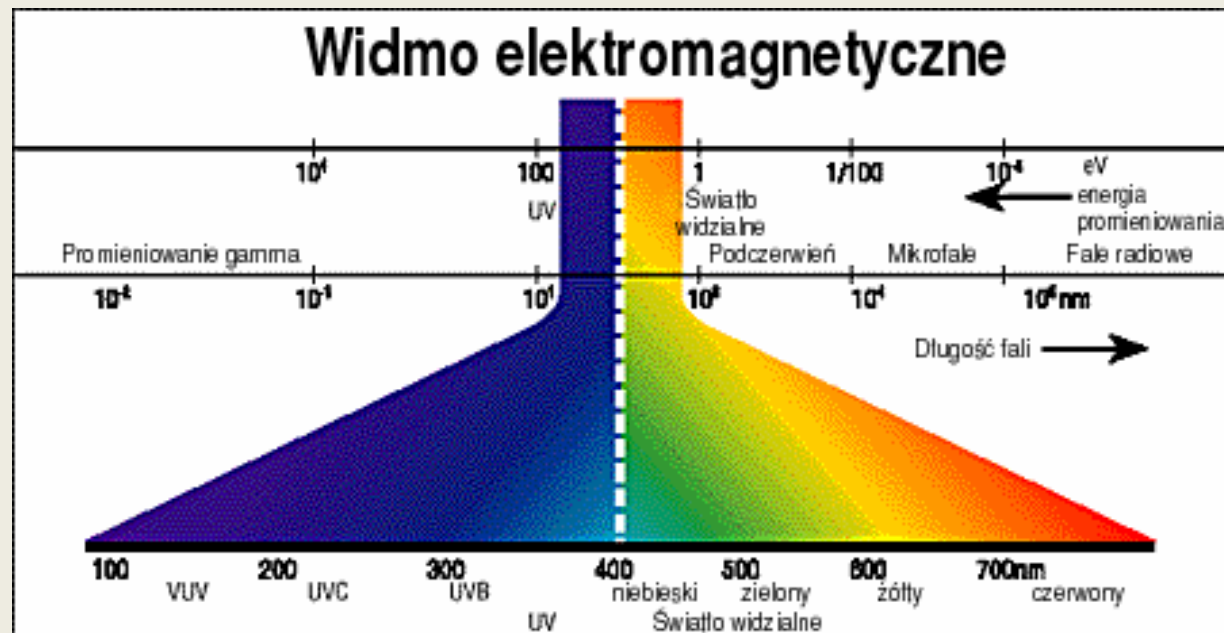
Zastyganie klejów

- Proces zastygania klejów utwardzanych UV: w stanie płynnym (1) monomery i fotoinicjatory współistnieją bez żadnych interakcji. Kiedy zostaną poddane działaniu światła UV (2), fotoinicjatory zmieniają się w wolne rodniki, które inicjują tworzenie się łańcuchów monomeru (3). Łańcuchy polimeryzacyjne sieciują tworząc wiązania poprzeczne (4).



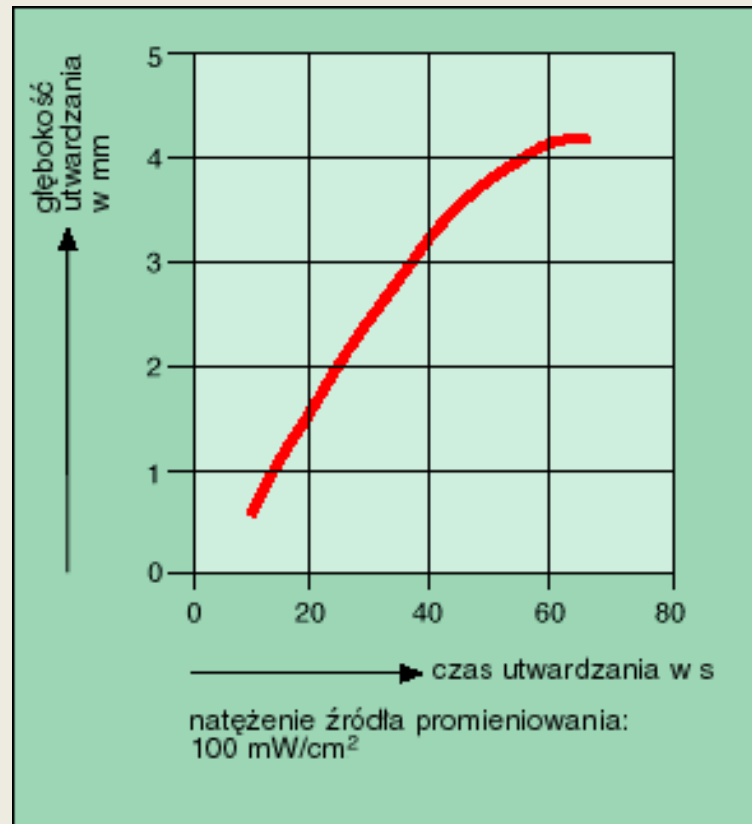
Utwardzanie wskrośne

- Dla osiągnięcia maksymalnie głębokiego utwardzenia kleju wskazane są systemy UV, które emitują światło o wysokim natężeniu i długościach fal rzędu od 300 do 400 nm (długofalowe światło UVA).



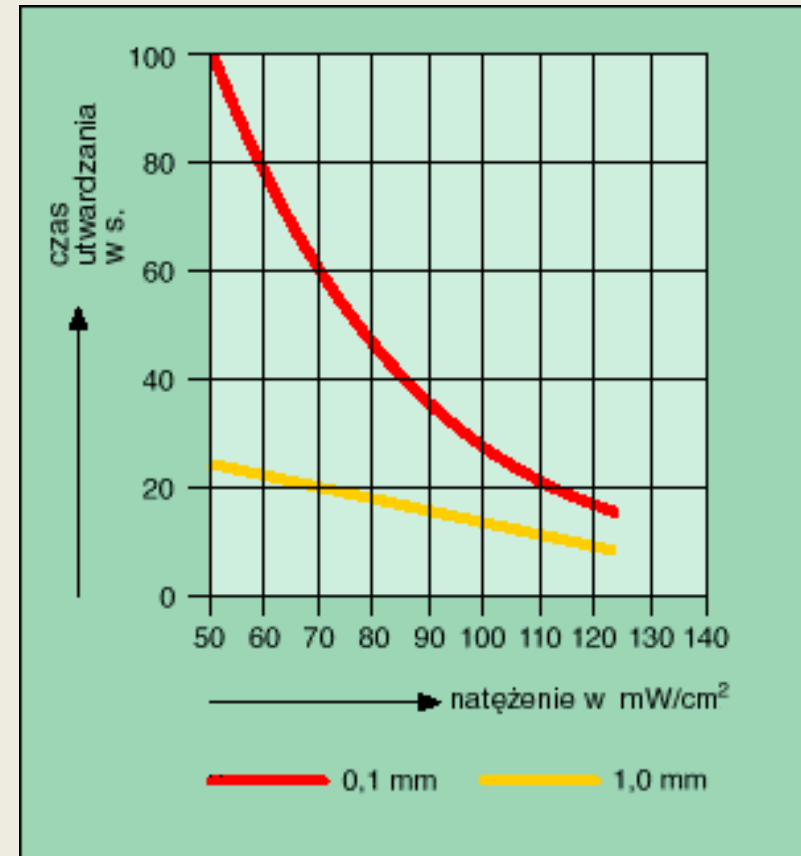
Utwardzanie wskrośne

- Typowe zachowanie produktów utwardzanych UV podczas utwardzania wskrośnego.



Utwardzanie powierzchniowe

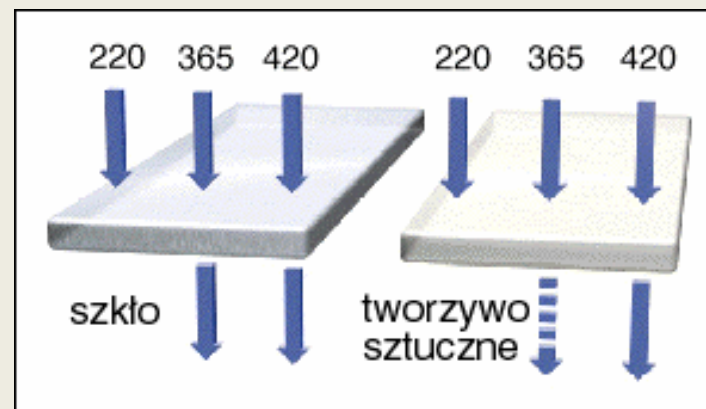
- źródło promieniowania UV powinno emitować fale o wysokim natężeniu w zakresie długości fal poniżej 280 nm (światło UVC). Jest to bardzo skuteczne, gdy chce się uniknąć niepożądanej reakcji przy kontakcie klejonej powierzchni z powietrzem atmosferycznym, które hamuje utwardzanie się produktu.
- Typowe zachowanie produktów utwardzanych UV podczas utwardzania powierzchniowego.



Utwardzanie przy pomocy mechanizmów wtórnych

- W wielu przypadkach światło UV nie dociera do wszystkich miejsc pokrytych klejem. Dlatego opracowano kleje z dodatkowymi systemami utwardzania w przestrzeniach nie objętych światłem UV:
 - * utwardzanie anaerobowe (beztlenowe)
 - * utwardzanie na gorąco
 - * utwardzanie poprzez wilgotność powietrza
 - * utwardzanie aktywatorem

- utwardzanie klejów UV zależy od długości fali i natężenia światła na powierzchni klejonej (stopień przenikalności różnych materiałów dla światła UV).
- Do łączenia części wykonanych z PC (poliwęglan), PVC (polichlorek winylu) czy podobnych materiałów, przeznaczone są "kleje utwardzane światłem widzialnym". Kleje te można utwardzać światłem UVA, lecz znacznie lepszy efekt uzyskuje się, gdy podda się je działaniu światła o dużym natężeniu i długości fali około 420 nm (światło widzialne).



- Kleje utwardzane światłem UV generalnie charakteryzują się następującymi właściwościami:
 - znaczna wytrzymałość
 - wysoka zdolność wypełniania szczelin
 - bardzo krótkie czasy utwardzania do osiągnięcia wytrzymałości ręcznej
 - dobra do bardzo dobrej odporność na środowisko
 - jako kleje jednoskładnikowe są łatwe do dozowania w automatycznych systemach nanoszenia

Kleje do łączenia z uchwytami

- Łączenie elementów konstrukcyjnych, soczewek i zwierciadeł do uchwytów
- Epoksydy, poliuretany, kleje cyjanoakrylowe
- Termoutwardzalne kleje epoksydowe – wysoka wytrzymałość wiązania oraz dobre właściwości termiczne, niektóre ulegają utwardzeniu w temperaturze pokojowej
- Uretany lub poliuretany – stosunkowa wysoka wytrzymałość, elastyczne, ze względu na „pełzanie” nie nadają się do pracy w wysokiej temperaturze ($>100^{\circ}$), nadaje się do zastosowań w niskich temperaturach
- Kleje cyjanoakrylowe – niska lepkość, są przystosowane do łączenia gładkich powierzchni wymagającej bardzo cienkiej grubości spoiwa, czas utwardzania – ok. 30 s, należy szczególnie dbać o skórę rąk podczas klejenia, bardziej niż inne kleje nadają się do zastosowań w środowisku o bardzo dużej wilgotności jak również temperaturze powyżej 70°C

TABLE 3.8 Properties of Representative Structural Adhesives

Material	Mfr. Code ^a	Recommended Cure (time at °C)	Cured Joint Strength (MPa[psi] at °C)	Temperature Range of Use (°C)	Thermal Expansion Coeff. (ppm/°C at °C)	Recommended Joint Thickness (mm)	Density at 25°C (g/cm ³)
One-part epoxies 2214Hi-Temp ^b	3M	40 min at 121	13.8 (2000) at 24 20.7 (3000) at 82	−55 to 177			
Two-part epoxies Milbond	SL	7 days at 25	14.5 (2099) at 25 6.8 (992) at 70		0.381 ± 0.025		
EC-2216B/A	3M	Fix: 2 hr at 65 Full: 7 days at 75	17.2 (2500) at 24 2.8 (400) at 82	−55 to 150	102 at 0–40 134 at 40–80	0.102 ± 0.025	
Gray		Fix: 6 hr at 65 Full: 30 days at 75	8.3 (1200) at 24 1.4 (200) at 82		81 at 50–0 207 at 60–150	0.102 ± 0.025	
Translucent							
27A/B	EC	24 hr at 25	13.8 (2000)	−65 to 105			
45	EC	24 hr at 25	21.4 (3100)	−40 to 90			1.34–1.18
324	L	Fix: 3 min at 20 Full: 24 hr at 20	10.3 (1500)	−54 to 135	12.6 (7.0)	>1.0 (0.040)	1.1
3532B/A	3M	3 days at 24	13.8 (2000) at 24 2.1 (300) at 82				
UV — curable UV-900	EC	UV cure: 15 sec at 200 W/in.; heat cure: 10 min at 120		−25 to 125		<3.2 (0.125)	1.04
349		Fix: 20 sec at 0.25 Full: 36 sec at 0.25 gap	5.2 (750)	−54 to 130			
460	L	Fix: 1 min at 22 Full: 7 days at 22	12.1 (1750)	−54 to 71	100 (56)	0.100 max	1.06

^a Mfr. code: 3M, SL = Summers Laboratories; EC = Emerson & Cummings; L = Loctite.

^b Also available in varieties with higher density, greater flexibility, or increased electrical resistivity.

Source: Adapted from Yoder, P.R., Jr. 1993. *Optomechanical Systems Design*, 2nd ed., pp. 144–146. Marcel Dekker, New York.

Kleje do łączenia z uchwytami

- Kauczuki (room temperature vulcanizing rubbers RTVs) – szeroko stosowane do klejenia zwierciadeł, soczewek, filtrów i okien optycznych do obudowy;
- są to elastomery silikonowe które są obojętne chemicznie, tolerancja na zmiany temperatury w zakresie -80°C - $+200^{\circ}\text{C}$ (lub więcej),
- główna zaleta: niski koszt oraz możliwość dostosowywania rozszerzalności cieplnej wynikającej z różnic pomiędzy metalowym mocowaniem (duża rozszerzalność) a elementem optycznym (mała rozszerzalność);
- wymagana jest dość gruba warstwa RTVs, co pozwala na zmniejszenie kosztów wytwarzania (elementy opt. i ich uchwyty nie muszą być obrabiane w wąskich granicach tolerancji);
- RTV jest sprężyste, co umożliwia różne przemieszczanie się elementu opt. i mocowania kiedy zmienia się temperatura otoczenia, bez wprowadzenia jakichkolwiek niekorzystnych naprężeń w elemencie optycznym

TABLE 3.9 Properties of Representative Elastomeric Sealants

Material	Mfr. Code ^a	Suggested Cure Time at °C	Elastomer Tensile Strength, MPa (psi)	Temperature Range of Use (°C [°F])	Thermal Expansion Coeff. (ppm/°C)	Density at 25°C (g/cm ³)	Shrinkage after 3 Days at 25°C (%)
732	DC	24 hr at 25	2.2 (325)	−55 to 200	310	1.04	
RTV112	GE	3 days at 2	2.2 (325)	<204 (400)	270 293	1.05	1.0
NUVA-SIL	L	UV cure 1 min or 7 days at 25	3.8 (550)	−70 to 260	167	1.35	0.4
3112	DC		4.5 (650)	−55 to 250	300	1.02	0.25
93–500	DC	7 days at 25 4 hr at 65	69 (100)	−55 to 155			
RTV88	GE	<24 hr at 25	5.9 (850)	−54 to 260	210	1.48	0.6
RTV8111	GE	<24 hr at 25	2.4 (350)	−54 to 204	250	1.18	0.6
RTV8262	GE	<24 hr at 25	5.2 (750)	−54 to 260	210	1.47	0.6

^a Mfr. code: 3M = 3M Company; DC = Dow Corning; GE = General Electric; L = Loctite.

Source: Adapted from Yoder, P.R., Jr. 1993. *Optomechanical Systems Design*, 2nd ed., pp. 148–149. Marcel Dekker, New York.