

УДК 620.179.18

**ВЛИЯНИЯ ВИДОВ И РЕЖИМОВ ПОСТОБРАБОТКИ ОТВЕРЖДЕННЫХ
ФОТОПОЛИМЕРНЫХ СМОЛ НА УПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ**

Протасеня Т.А., Ланцман Г.А., Кутепов А.Ю.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. По результатам исследований установлено, что доотверждение полимерных изделий при высоких температурах (вплоть до 160 °С) и УФ-излучении мощностью 39 Вт позволяет повысить их прочность и модуль упругости на 170 % и 85 % соответственно по сравнению с состоянием до обработки. Данный режим доотверждения является оптимальным в отношении исследуемой высокотемпературной смолы *High Temp RS-F2-HTAM-01*. Для оперативного контроля свойств полимерных материалов, а также объективной оценки эффективности режимов их завершающей полимеризации предложено использовать метод динамического индентирования. Доказано, что чувствительность метода к изменению физико-механических характеристик изделий, полученных по *SLA*-технологии, при различных видах и режимах их постобработки сопоставима с чувствительностью стандартных испытаний на растяжение.

Ключевые слова: модуль упругости, предел прочности, твердость, *SLA*-технология, индентирование.

**EFFECTS OF DIFFERENT TYPES AND MODES OF POST-PROCESSING OF HARDENED
PHOTOPOLYMER RESINS ON THE ELASTIC AND STRENGTH PROPERTIES OF PRODUCTS
PRODUCED BY THE METHOD OF LASER STEREOLITOGRAPHY**

Pratasenia T.A., Lantsman G.A., Kutsepau A.Y.

*The Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. According to the results of the research, it was found that the post-curing of polymer products at high temperatures (up to 160 °C) and UV radiation with a power of 39 W makes it possible to increase their strength and elasticity modulus by 170 % and 85 %, respectively, compared with the state before processing. This post-curing mode is optimal in relation to the investigated high-temperature resin *High Temp RS-F2-HTAM-01*. For the operational control of the properties of polymeric materials, as well as an objective assessment of the effectiveness of the modes of their final polymerization, it is proposed to use the method of dynamic indentation. It has been proven that the sensitivity of the method to changes in the physical and mechanical characteristics of products obtained by *SLA* technology, with various types and modes of their post-processing, is comparable to the sensitivity of standard tensile tests.

Key words: elastic modulus, tensile strength, hardness, *SLA*-technology, indentation.

*Адрес для переписки: Протасеня Т.А., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: 5657397@gmail.com*

Лазерная стереолитография (*SLA*-технология) – это процесс аддитивного производства, при котором изделие формируется путем послойного отверждения фотополимерной смолы под действием лазера. Фотополимерные смолы, находясь изначально в жидком состоянии, представляют собой множество несвязанных мономеров, способных под действием лазера образовывать сшитую макромолекулу. Однако по окончании печати остается множество участков с недостаточно прочными связями, что негативно сказывается на физико-механических характеристиках изделий.

Как правило для повышения их упругих и прочностных свойств используется УФ-излучение, под действием которого происходит завершение формирования молекулярных связей. На процесс отверждения влияет не только УФ-излучение, но и температура. Дополнительное тепловое воздействие приводит к увеличению энергии в полимер-

ной сетке и провоцирует ускоренное движение молекул, что значительно облегчает процесс образования межмолекулярных связей. Тем не менее УФ-излучение является неотъемлемой составляющей процесса постобработки, а термическое воздействие является лишь дополнительным фактором, повышающим качество молекулярной сшивки и ускоряющим процесс доотверждения.

Но наряду с положительным действием ультрафиолета и температуры возможен и обратный эффект, связанный с деградацией материала и повышением его хрупкости. Каждый полимер реагирует на постобработку по-разному и требует разного времени и температурных условий для достижения оптимальных свойств. В этой связи целью исследования являлось исследование комплексного влияния УФ-излучения и температуры на формирование физико-механических характеристик изделий, полученных по *SLA*-технологии,

а также оценка возможности применения в качестве альтернативы общепринятым разрушающим испытаниям метода динамического индентирования (МДИ) для контроля свойств полимерных изделий и оперативного контроля эффективности режима постобработки.

Экспериментальные образцы для проведения исследований изготавливались из инженерной высокотемпературной смолы *High Temp RS-F2-HTAM-01*. Толщина элементарного слоя составляла 100 мкм. Доотверждение материала проводилось под действием УФ-излучения мощностью 36–39 Вт и температуры 60 °С на протяжении 30–80 мин. Для оценки влияния термообработки на физико-механические характеристики изделий завершающим этапом их доотверждения являлся нагрев до температуры 160 °С и выдержка на протяжении 30, 60 и 90 мин.

Результаты испытаний на растяжение таких образцов (предел прочности σ_m и модуль упругости E_S), а также данные, полученные МДИ при нагружении сферическим индентором диаметром 2,3 мм, массой 4,3 г с предупредительной скоростью 0,88 м/с (динамическая твердость H_{IT} и модуль упругости E_{IT}) приведены на рисунке 1.

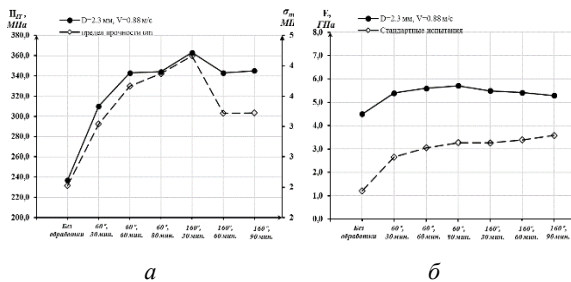


Рисунок 1 – Зависимости изменения H_{IT} и σ_m (а) и E_{IT} и E_S (б) полимера от режимов доотверждения

Как видно из рисунка 1 данные динамического индентирования качественно соответствуют результатам стандартных испытаний. Установлено, что максимальными значениями H_{IT} (363 МПа) обладают образцы, подвергшиеся дополнительному температурному воздействию (160 °С) на протяжении 30 мин. Увеличение времени выдержки до 60 мин. привело к снижению σ_m и H_{IT} на 20 % и 6 % соответственно при незначительной вариации модуля упругости. Выдержка образцов при температуре 160 °С на протяжении 90 мин не привела к существенным изменениям прочностных и упругих свойств как по данным стандартных испытаний, так и по результатам динамического индентирования.

На рисунке 2 полученные результаты дополнены данными о свойствах исследуемого материала, подвергнутого только воздействию УФ-излучения мощностью 36–48 Вт, и представлены в виде зависимости процентного увеличения предела прочности σ_m и модуля упругости E_S при растяжении (рисунок 2).

Как видно из представленных графиков, воздействие на исследуемый материал УФ-излучения (36–48 Вт) вызывает достаточно равномерное увеличение предела прочности и модуля упругости, которое продолжается на протяжении рассматриваемых 60 мин.

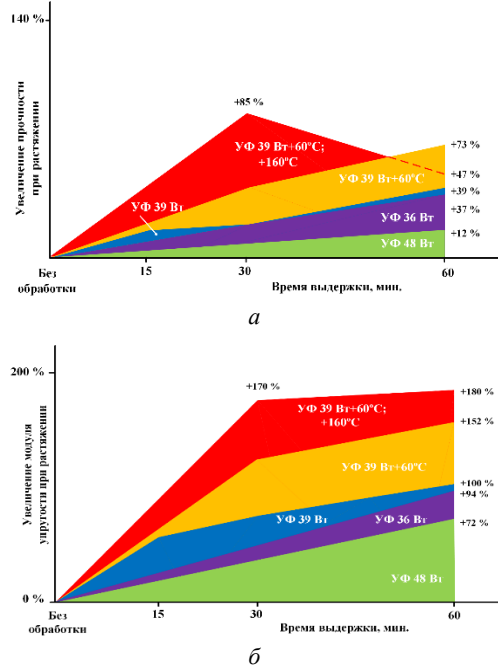


Рисунок 2 – Зависимости увеличения σ_m (а) и E_S (б) от времени выдержки полимера при различных видах постобработки

Однако повышение мощности излучения до 48 Вт вызывает деградацию полимера, что выражается в наименьшем процентном приращении σ_m и E_S . Для исследуемой смолы *High Temp RS-F2-HTAM-01* оптимальным оказалось доотверждение при УФ-излучении мощностью 39 Вт. Дополнительное воздействие температуры (режим 39 Вт + 60 °С) оказывает наибольшее влияние на модуль упругости исследуемого полимера. В первые 60 минут финальной полимеризации установлено максимальное увеличение E_S на 152 %, а σ_m – на 73 %. Улучшить результат удалось при последующей термообработке изделий при 160 °С. В течение первых 30 минут выдержки σ_m и E_S резко повышаются и достигают максимального увеличения на 85 % и 170 %, соответственно. Однако если в течение следующих 30 минут модуль упругости постепенно нарастает (до 180 %), то предел прочности резко падает до 47 %, что может быть следствием повышения хрупкости материала.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: проект № T22M-004 «Развитие метода локального контактного деформирования для неразрушающего контроля полимерных изделий, полученных путем аддитивного синтеза».