

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКОГО СТЕКЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В.С. Ковивчак, Т.В. Панова, Д.Д. Руренко, Т.Н. Черноок
Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского,
пр. Мира, 55а, Омск, 644077, Россия, kvs@univer.omsk.su; PanovaTV@omsu.ru

Исследованы повреждения натрий-силикатного стекла, вызванные воздействием мощного ионного пучка наносекундной длительности с различной плотностью тока. Определены характерные виды повреждений (волосные и дискообразные трещины). Обсуждены возможные механизмы их образования.

Введение

Модификация поверхностных свойств материалов под действием мощного ионного пучка (МИП) наносекундной длительности происходит вследствие протекания ряда быстрых физических процессов – нагрева, плавления, кристаллизации расплава, охлаждения. После протекания этих процессов в приповерхностных слоях остаются остаточные напряжения, знак которых (отрицательные - растягивающие или положительные - сжимающие) существенно влияет на эксплуатационные характеристики модифицированных материалов. Формирование растягивающих напряжений критической величины приводит к разрушению материала. Экспериментальное исследование напряженного состояния в металлах и сплавах различными методами дает их усредненное значение по большой площади, хотя разрушение всегда начинается с локальных областей, имеющих напряжения превышающие предел прочности.

В работе для установления общих тенденций разрушения материалов, облучаемых МИП используется модельный материал, в качестве которого выбрано натрий-силикатное стекло, обладающее невысокой механической прочностью и прозрачное в видимом диапазоне, что позволяет исследовать как поверхностное, так и объемное разрушение.

Основная часть

Облучение образцов стекла проводилось на ускорителе "Темп" ионным пучком со следующими параметрами: состав пучка - 70% C^+ и 30% H^+ , $E = 250$ КэВ, $j = 20 - 150$ А/см², $\tau = 60$ нс. В экспериментах варьировались средняя плотность тока (j), число импульсов облучения (n), температура образцов в момент облучения (T). Толщина образцов (1,5 – 2,5 мм) значительно превышала проективный пробег ионов углерода и протонов пучка в стекле. Перед облучением образцы подвергались отжигу для уменьшения механических напряжений. Для облучения стекол при повышенных температурах (до 250°C) использовался резистивный нагреватель. За 2 секунды до облучения нагреватель отключался, чтобы исключить влияние магнитного поля нагревателя на ионный пучок. Морфологию поверхности и приповерхностного слоя облученных стекол исследо-

вали методами сканирующей электронной и оптической микроскопии.

Воздействие МИП с $j \geq 20$ А/см² и $n=1$ на натрий-силикатное стекло приводит к образованию на облученной поверхности сетки поверхностных, так называемых "волосных" трещин (рис. 1).

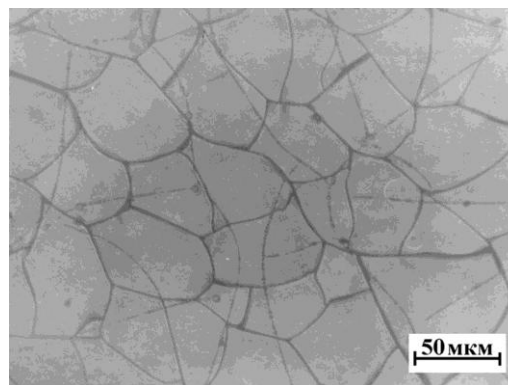


Рис. 1. Поверхность натрий-силикатного стекла после воздействия МИП с $j=150$ А/см² и $n=1$ (поверхность покрыта тонким слоем алюминия).

С увеличением j поперечный размер блоков разрушения (областей материала ограниченных "волосными" трещинами) уменьшается. Увеличение n от 1 до 3 при фиксированной плотности тока пучка ($j = 150$ А/см²) так же приводит к уменьшению средних поперечных размеров блоков разрушения. "Волосные" трещины на поверхности распределены неравномерно, что отражает пространственное распределение поля напряжений, возникающего при воздействии МИП. При $j \geq \sim 70$ А/см² появляются новые очаги разрушения в виде трещин, параллельных поверхности облучения. При наблюдении в отраженном свете на этих трещинах образуются интерференционные кольца, которые свидетельствуют о "дискообразной" форме этих трещин (рис. 2). В стекле "дискообразные" трещины локализованы на глубинах до ~ 15 мкм от облучаемой поверхности. Значительная часть разрушенных фрагментов из-за отслоения оказывается приподнятой над поверхностью, а некоторые из них вообще удалены. После удаления фрагментов в области этих трещин отчетливо видны полости правильной цилиндрической формы (рис.

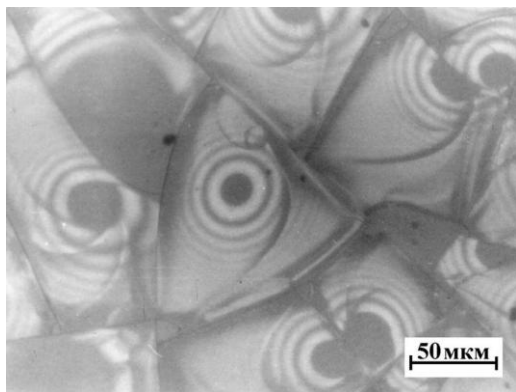


Рис. 2. Поверхность натрий-силикатного стекла после воздействия МИП с $j=100 \text{ A/cm}^2$ и $n=1$.

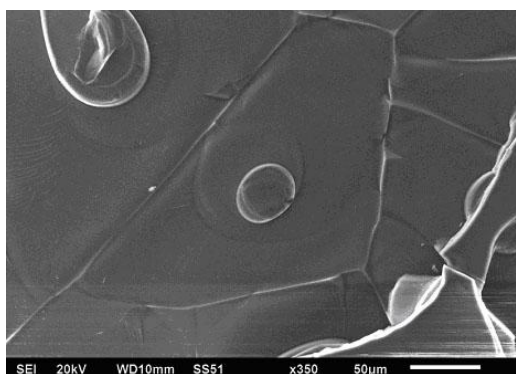


Рис. 3. Поверхность «дискообразной» трещины в натрий-силикатном стекле после воздействия МИП с $j=150 \text{ A/cm}^2$ и $n=1$.

3), которые, как правило, смещены относительно центра фрагмента разрушения. Установлено, что "дискообразные" трещины образуются не только в момент облучения, но и в течение достаточно большого промежутка времени после облучения (до 8-24 ч). Термообработка натрий-силикатного стекла сразу после облучения в течение 5 минут при $T \geq 250^\circ\text{C}$ подавляет дальнейший рост "дискообразных" трещин. Облучение стекла МИП с $j=150 \text{ A/cm}^2$ при повышенных температурах показало существенное изменение картины разрушения. Так, при температуре образца $T=110^\circ\text{C}$ наблюдается уменьшение плотности поверхностных "волосных" трещин, а "дискообразные" трещины начинают появляться только спу-

стя примерно 1 ч после облучения. Увеличение T до 250°C приводит к дальнейшему снижению плотности поверхностных трещин, а "дискообразные" трещины не наблюдаются вообще. Снижение плотности тока до $\sim 100 \text{ A/cm}^2$ с одновременным увеличением n до 10 при этой же температуре приводит к снижению плотности поверхностных трещин, а также к отслоению существенно больших по размерам (\sim в 20 раз) фрагментов стекла. Подобного рода разрушения наблюдаются при воздействии искрового и дугового разрядов на натриевые стекла [1] и связываются с термическим ударом при поглощении излучения. В работе [1] предполагается, что в стекле образование поверхностных "волосных" трещин и расслоение происходит при охлаждении, когда растягивающие напряжения, возникающие в результате течения при нагреве, достигают больших значений. Расслоение происходит только в тех случаях, когда коэффициент термического расширения стекла достаточно высок, тогда как в стеклах с малым коэффициентом термического расширения расслоение не наблюдается. Однако в случае воздействия МИП на натрий-силикатное стекло наблюдаются интерференционные кольца, которые свидетельствуют о высокой симметрии отслоения, что не наблюдается при воздействии электрической дуги [1].

Заключение

При воздействии МИП на натрий-силикатное стекло на его поверхности образуются "волосные", а в объеме "дискообразные" трещины, приводящие к отслоению отдельных фрагментов. Возникновение последних наблюдается в течение достаточно длительного промежутка времени (8-24 ч) после облучения. Исследование морфологии "дискообразных" трещин позволяет предположить, что их развитие начинается из цилиндрических полостей, возникновение которых связано со сложным полем остаточных растягивающих напряжений, генерируемых в приповерхностном слое при воздействии МИП.

Исследования выполнены при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Омской области в рамках научного проекта № 15-48-04410 р_сибирь_а.

Список литературы

1. Разрушение. Т. 6. Разрушение металлов / Ред. Г. Либовиц. М.: Металлургия, 1976. 496 с.

SURFACE DAMAGE OF INORGANIC GLASS IRRADIATED HIGH POWER ION BEAM OF NANOSECOND DURATION

V.S. Kovivchak, T.V. Panova, D.D. Rurenko, T.N. Chernook
Omsk State University, pr. Mira 55a, Omsk, 644077, Russia
kvs@univer.omsk.su; PanovaTV@omsu.ru

Surface damage of sodium silicate glass caused by exposure to high-power ion beam of nanosecond duration with different current densities was studied. The characteristic types of damage («hairline» and disk-shaped cracks) have been found. When the beam current density exceeds 20 A/cm^2 «hairline» cracks appear. Disk-shaped cracks are formed at a current density of the beam current of 70 A/cm^2 . Possible mechanisms of their formation are discussed.