

Атермический лазерный отжиг холоднодеформированного алюминия

А. Б. Цепелев, Е. Е. Казилин, С. А. Масляев, В. Н. Мельников,
С. И. О. Садыхов, Н. А. Виноградова

Исследовано влияние импульсного лазерного облучения на механические свойства отожженного и холоднодеформированного чистого алюминия. Механические испытания проводили методом вдавливания цилиндрического пуансона в дисковые микрообразцы диаметром 3 мм. Установлено, что лазерное облучение не влияет на механические свойства отожженного алюминия, но приводит к разупрочнению холоднодеформированного материала. После 100 импульсов облучения происходит почти полный возврат прочности алюминия к значению, характерному для отожженного состояния. Пластичность холоднодеформированного алюминия ниже, чем отожженного, и в процессе лазерного облучения не меняется. Проведены оценки термического и ударно-волнового механизмов лазерного воздействия, из которых следует, что при данных параметрах облучения основной вклад в изменение свойств дает ударно-волновой механизм, связанный с генерацией и прохождением акустических волн, стимулирующих процесс атермического отжига и возврата дислокационной структуры.

Ключевые слова: импульсное лазерное облучение, алюминий, механические свойства метод вдавливания пуансона в дисковый микрообразец, дислокационная перестройка, атермический отжиг.

Введение

В последние годы возрастает интерес к применению концентрированных потоков энергии в технологических процессах получения и обработки материалов, в результате чего эти материалы приобретают уникальные свойства, недостижимые при использовании традиционных методов обработки. Чаще всего для этого применяют мощные (сильноточные) электронные или ионные пучки, а также лазерное излучение, что позволяет сочетать особенности термической (но с недостижимыми в обычных условиях скоростями и локальностью нагрева обрабатываемых областей) и радиационной (обусловленной введением и отжигом радиационных дефектов) обработки. Очень часто после такой радиационно-термической обработки в материале фиксируется неравновесная структура, а его свойства существенно изменяются.

Другой важной областью применения концентрированных потоков энергии является экспериментальное моделирование процессов, протекающих в материалах в условиях мощных энергетических воздействий [1], как, например, в элементах кон-

струкции первой стенки термоядерного реактора. Обычно в установках типа токамак на материал, обращенный к термоядерной плазме, периодически воздействуют импульсные тепловые потоки от ~ 1 до 100 МДж/м², при этом “мгновенная” плотность мощности достигает $W \approx 10^5$ Вт/см² [2, 3].

Возможность жестких импульсных термических нагрузок требует проведения специальных испытаний для определения термостойкости материалов в условиях воздействия экстремальных энергетических потоков. Один из вариантов таких имитационных испытаний реализуется с помощью установок типа “Плазменный фокус” (ПФ), генерирующих мощные импульсные пучки горячей плазмы и ускоренных ионов. Тепловые нагрузки на поверхность образцов в установках ПФ могут быть сопоставимы с нагрузками, возникающими в установках типа токамак [4], однако множественный характер факторов воздействия (плазма, ионы, электроны) затрудняет интерпретацию полученных результатов.

Гораздо более “чистым” источником мощного импульсного энергетического воздействия представляется лазерное излучение, использование которого позволяет исключить изменение элементного (и,

возможно, фазового) состава материала мишени, вызванное внедрением примесных атомов, как это происходит, например, при плазменном или ионном облучении. Наличие целой линейки промышленных лазеров разной мощности, генерирующих импульсы длительностью от микро- до фемтосекунд, а также возможность фокусирования лазерного излучения в пятно различного диаметра позволяет достигать очень больших (до ГВт/см²) значений плотности мощности, выделяющейся на поверхности мишени, при этом площадь обрабатываемой поверхности может быть значительно увеличена за счет сканирования лазерного луча. Варьируя параметры лазерного облучения (мощность, длительность импульсов, шаг сканирования и т.д.), можно существенно изменять условия термического воздействия на материал и, таким образом, добиваться модифицирования свойств тонкого поверхностного слоя в нужном направлении. Все это, а также возможность легкой автоматизации процесса привело к быстрому развитию и широкому распространению лазерной технологии как одному из перспективных способов обработки и модифицирования материалов [5].

Поглощение энергии лазерного излучения в тонком поверхностном слое материала может приводить к его абляции, нагреву, расплавлению и испарению. В любом случае основным фактором воздействия на материал считается хоть и специфическое по своей природе (из-за высокой энергии и плотности мощности, локальности и малой длительности), но все-таки термическое воздействие, стимулирующее процессы теплопереноса [6]. В то же время, известен еще один, ударно-волновой механизм изменения структуры и свойств материалов при лазерном облучении [7 – 9], связанный с распространением в их объеме акустических и ударных волн. В отличие от термического, ударно-волновой механизм лазерного воздействия является объемным, и характерная глубина термически модифицированного слоя при лазерном воздействии обычно не превышает ~ 1 мкм, тогда как глубина ударно-волнового воздействия на 2 – 3 порядка больше.

Цель данной работы — исследование влияния ударно-волнового механизма на изменение механических свойств отожженного и холоднодеформированного алюминия после лазерного облучения.

Методика эксперимента

Исследования проводили на фольгах чистого (99,99 %) алюминия толщиной 0,23 мм в отожженном (300 °С, 3 ч) и холоднодеформированном (20 %) состоянии. Механические свойства алюминия

оценивали по результатам испытаний дисковых микрообразцов диаметром 3 мм методом вдавливания цилиндрического пуансона (Miniaturized Disk Bend Test technique — MDBT) [10].

Образцы облучали на лазере ГОС-1001 ($\lambda = 1,06$ мкм) в режиме модулированной добротности. Энергия импульса Q составляла 2,5 Дж, длительность $\tau = 50$ нс. Излучение фокусировалось в пятно диаметром $d \approx 5$ мм и, таким образом, полностью перекрывало всю поверхность мишени. Плотность потока энергии в таких условиях составляла $W \approx 1 \cdot 10^9$ Вт/см². Облучение проводили сериями 1, 10 и 100 импульсов, интервалы времени между импульсами были достаточными для полного выравнивания температуры по толщине фольги и остывания образцов до исходной комнатной температуры.

Для каждого состояния материала (отожженный, холоднодеформированный, облученный разным количеством лазерных импульсов) испытывали по пять дисковых микрообразцов, что было достаточно для качественного анализа тенденции изменения прочностных свойств алюминия после лазерного облучения по изменению вида кривой нагружения “нагрузка – деформация”.

Результаты

MDBT испытания исходных образцов алюминия показали, что холодная деформация приводит к упрочнению и снижению пластичности металла, что на кривой нагружения дисковых микрообразцов “нагрузка – прогиб образца” отражается в увеличении максимальной нагрузки, качественно соответствующей пределу прочности σ_B на кривой растяжения “обычных” плоских образцов, и уменьшении прогиба образца до достижения максимальной нагрузки (величины, качественно соответствующей удлинению δ при растяжении плоских образцов). Таким образом, кривая нагружения дисковых микрообразцов оказалась достаточно чувствительной к изменению механических свойств материала после его обработки, в данном случае — холодной деформации. И хотя определить стандартные количественные характеристики механических свойств металла (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ) непосредственно из MDBT-кривых невозможно, однако качественно оценить влияние разных видов обработки, в том числе и облучения, на механические свойства материала достаточно просто.

Было установлено, что вид кривых нагружения дисковых микрообразцов отожженного алюминия практически не меняется после 1 и 10 импульсов

лазерного облучения, то есть лазерное облучение не влияет на механические свойства исходного отожженного алюминия. В то же время, лазерное облучение холоднотемпературного алюминия приводит к снижению величины максимальной нагрузки, то есть к его разупрочнению (рис. 1). Как видно, по мере увеличения числа лазерных импульсов прочность холоднотемпературных образцов снижается и после 100 импульсов облучения становится близкой к прочности исходного отожженного алюминия. При этом пластичность холоднотемпературных образцов алюминия после лазерного облучения не восстанавливается и остается практически такой же, как у исходного холоднотемпературного образца.

Обсуждение

Импульсное лазерное облучение практически не влияет на механические свойства отожженного алюминия, но вызывает разупрочнение холоднотемпературного алюминия. Величина разупрочнения пропорциональна количеству импульсов лазерного излучения, и после 100 импульсов максимальная нагрузка до разрушения дисковых микрообразцов (аналог предела прочности σ_B) становится близкой к соответствующей характеристике исходного отожженного алюминия.

Величина прогиба дискового микрообразца (параметра, качественно аналогичного удлинению δ при растяжении плоских образцов) после холодной деформации уменьшилась более чем в $\sim 1,5$ раза и практически не изменялась после лазерного облучения.

Естественно предположить, что единственным результатом холодного деформирования чистого алюминия является повышение плотности дислокаций в его структуре, и именно эти структурные изменения приводят к упрочнению и соответствующему снижению пластичности холоднотемпературного алюминия, что и было зафиксировано по изменению вида MDBT-кривых нагружения исходных образцов отожженного и холоднотемпературного алюминия (рис. 1, кривые 1 и 5). В таком случае обратный эффект стимулированного лазерным облучением разупрочнения холоднотемпературного алюминия, вероятнее всего, связан с отжигом (возвратом) дислокационной структуры. Возможны два механизма такого отжига — термический, за счет нагрева микрообразцов в процессе лазерного облучения, и атермический, за счет прохождения лазерно-индуцированных ударных и/или акустических волн. Были проведены численные оценки возможного вклада каждого из этих механизмов в изменение

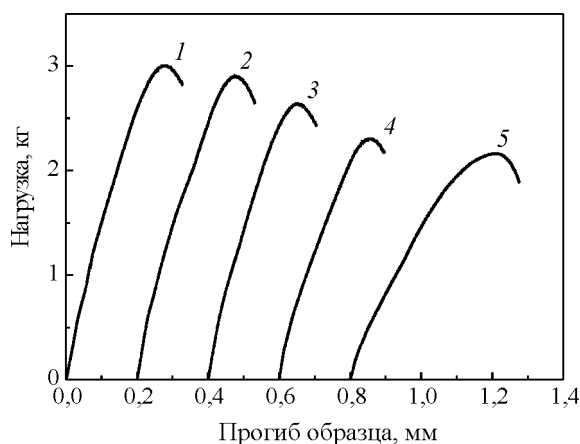


Рис. 1. MDBT-кривые нагружения дисковых микрообразцов алюминия: 1 — исходного холоднотемпературного; 2 — холоднотемпературного после 1 импульса лазерного облучения; 3 — холоднотемпературного после 10 импульсов лазерного облучения; 4 — холоднотемпературного после 100 импульсов лазерного облучения; 5 — исходного отожженного. На графике приведено по одной типичной кривой нагружения для каждой серии образцов, для наглядности начало координат каждой кривой сдвинуто по оси абсцисс на 0,2 мм.

механических свойств алюминия при импульсном лазерном облучении.

Термическое воздействие

Анализ облученной поверхности образца показал, что воздействие мощного импульсного лазерного излучения приводило к нагреву, плавлению и испарению тонкого поверхностного слоя материала мишени. Для оценки характера распределения температуры по глубине образца проведено численное моделирование процесса теплопереноса в материале при лазерном облучении. При расчетах использовали одномерную модель на основе уравнения теплопроводности, которое решали конечно-разностным методом по схеме, аналогичной описанной в [6]. Коэффициент поглощения лазерного излучения поверхностью облучаемой фольги принимали равным 0,5.

Из результатов расчетов следует, что при воздействии мощного лазерного импульса происходит быстрый нагрев, плавление и испарение тонкого поверхностного слоя образца. Распределение температуры в алюминиевой фольге в разные моменты времени приведено на рис. 2, при этом время существования жидкой фазы не превышало 22 нс (рис. 3). Согласно оценкам, максимальная толщина слоя расплава на поверхности образца

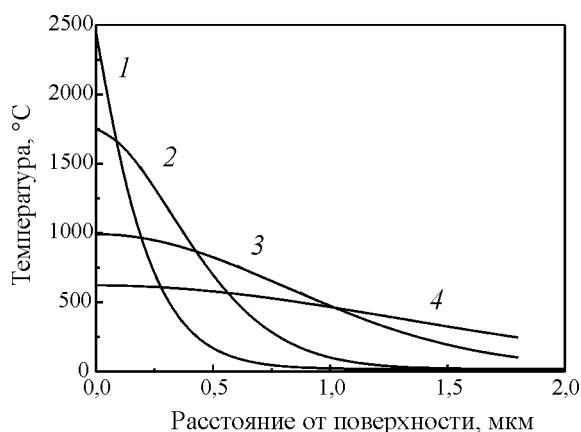


Рис. 2. Распределение температуры по глубине поверхностного слоя фольги алюминия для различных моментов времени t от начала действия лазерного импульса, нс: 1 — 13; 2 — 15; 3 — 17; 4 — 22.

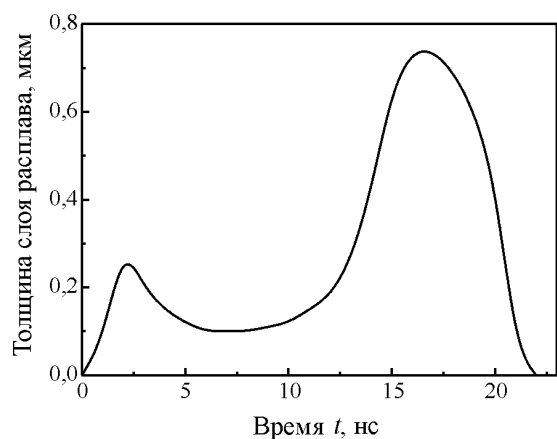


Рис. 3. Изменение толщины расплавленного слоя со временем.

составляет $\sim 0,75$ мкм, а толщина испаренного слоя не превышала ~ 1 мкм. Эти результаты находятся в разумном согласии с экспериментальными данным по убыли массы облученных образцов, согласно которым толщина испаренного слоя даже после воздействия 100 лазерных импульсов не превышает 0,5 мкм.

Расчеты показывают, что при импульсном лазерном облучении значительному нагреву подвергался только тонкий поверхностный слой образца толщиной 2 – 3 мкм (не считая толщины испаренного слоя), в основном же объеме фольги повышение температуры было незначительным и составляло $\sim 3,5$ К.

Таким образом, объяснить эффект разупрочнения холоднодеформированного алюминия уменьшением толщины дисковых образцов за счет испарения поверхностного слоя невозможно по трем

причинам: во-первых, при толщине исходных образцов 230 мкм их утонение на 1 мкм не может вызывать столь заметное уменьшение прочностных характеристик, как это происходило в экспериментах; во-вторых, на рис. 1 наблюдается явно выраженный эффект снижения величины максимальной нагрузки при увеличении числа лазерных импульсов, тогда как взвешивание облученных образцов не выявило зависимости убыли массы от числа импульсов облучения (хотя при этом, конечно, следует отметить достаточно большой разброс экспериментальных данных по изменению массы образцов); и в третьих, наконец, если бы разупрочнение облученных образцов было связано с их испарением, то этот эффект наблюдался бы не только на холоднодеформированных, но и на отожженных образцах, прочностные характеристики которых не изменились после лазерного облучения.

Ударно-волновое воздействие

Из полученных результатов следует, что связанное с испарением уменьшение толщины дисковых образцов не может приводить к заметному изменению механических свойств облученного материала, однако интенсивное испарение тонкого поверхностного слоя сопровождается генерацией импульса давления на поверхность облучаемого образца. Это давление в виде акустической волны (акустического импульса) распространяется вглубь материала.

Численное моделирование процесса генерации и распространения ударной волны в фольге алюминия при импульсном лазерном облучении проводили с использованием одномерной гидродинамической модели [11]. Результаты расчетов профиля давления в материале в различные моменты времени представлены на рис. 4.

Как видно, по мере распространения волны давления происходит некоторое изменение ее профиля, что проявляется в постепенном увеличении асимметрии импульса. Однако формирование ударной волны с вертикальным передним фронтом за время движения волны от облучаемой поверхности к тыльной поверхности фольги не происходит. Несмотря на это, амплитуда импульса давления в несколько раз превышает предел текучести алюминия, а градиент давления на переднем фронте волны при этом достигает $\sim 5 \cdot 10^{13}$ Па/м.

Естественно предположить, что наблюдаемый в наших экспериментах эффект разупрочнения холоднодеформированного алюминия после импульсного лазерного облучения связан с индуцированным

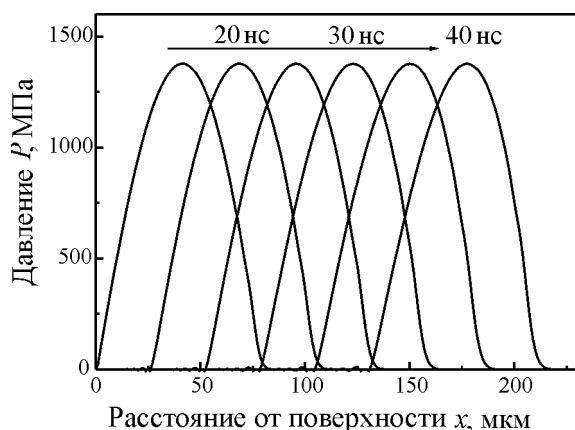


Рис.4. Распространение импульса давления через облучаемую фольгу.

лазерным облучением процессом отжига неравновесной дислокационной структуры, протекающим в условиях, далеких от состояния термодинамического равновесия. Необходимым условием для отжига дислокационной структуры является облегчение процесса скольжения дислокаций, что может происходить под действием полей напряжений, возникающих при прохождении волн давления. Возможно, также, ускоренное преодоление дислокациями препятствий за счет поглощения избыточных точечных дефектов, генерируемых на фронте волн давления.

Ранее подобные механизмы влияния лазерного облучения, связанные с прохождением ударной волны через кристалл и генерацией точечных дефектов, наблюдали в Ni [12] и Si [13], а вызванное лазерным облучением изменение дислокационной структуры отмечали в монокристаллах Mo [14].

В хорошо отожженном алюминии плотность дислокаций мала и дислокационная структура находится в состоянии, близком к термодинамическому равновесию, поэтому появление избыточных точечных дефектов, способных стимулировать диффузионно-контролируемые процессы, не вызывает сколько-нибудь заметного изменения дислокационной структуры, и так близкой к равновесию.

Выводы

Экспериментально обнаружен эффект разупрочнения холоднодеформированного чистого алюминия при импульсном лазерном облучении. С увеличением числа импульсов облучения возврат свойств усиливается, и после 100 импульсов происходит почти полный возврат прочности к значению, характерному для отожженного алюминия. Пластичность холоднодеформированного алюминия при

лазерном облучении не меняется. Наблюдаемый эффект разупрочнения объяснен возвратом дислокационной структуры к равновесному состоянию в процессе атермического отжига, индуцированного ударно-волновым механизмом лазерного воздействия, связанным с генерацией и прохождением по объему материала ударных и/или акустических волн.

Литература

1. Иванов Л.И., Пименов В.Н., Грибков В.А. Взаимодействие мощных импульсных потоков энергии с материалами. Физика и химия обработки материалов, 2009, № 1, с. 23 – 37.
2. Kirk A., Koch B., Scannell R., Wilson H.R., Counsell G., Dowling J., Herrmann A., Martin R., Walsh M. Evolution of filament structures during edge-localized modes in the MAST Tokamak. Phys.Rev.Lett., 2006, v. 96, iss. 18, 185001.
3. Loewenhoff Th., Hirai T., Keusemann S., Linke J., Pintsuk G., Schmidt A. Experimental simulation of Edge Localized Modes using focused electron beams — features of a circular load pattern. J.Nucl.Mater., 2011, v. 415, iss. 1, Suppl., p. S51 – S54.
4. Масляев С.А., Пименов В.Н., Грибков В.А., Демин А.С. Повреждаемость хромомарганцевых сталей импульсными потоками ионов и плотной плазмы при их раздельном воздействии на материал в установке Плазменный Фокус. Перспективные Материалы, 2011, № 1, с. 15 – 22.
5. Лазерные технологии обработки материалов: Современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. Ред. В.Я.Панченко. М.: Физматлит, 2009, 664 с.
6. Масляев С.А. Тепловые эффекты при импульсном облучении материалов в установке Плазменный Фокус. Перспективные материалы, 2007, № 5, с. 47 – 55.
7. Бондаренко Г.Г., Иванов Л.И., Янушкевич В.А. Воздействие гигантских импульсов лазера на микроструктуру алюминия. Физика и химия обработки материалов, 1973, № 4, с. 19 – 21.
8. Лариков Л.Н., Фильченко В.М., Мазанко В.Ф. Аномальное ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов. Докл. АН СССР, сер.: Математика и физика, 1975, т. 221, № 5, с. 1073 – 1075.
9. Иванов Л.И., Литвинова Н.А., Янушкевич В.А. Аномальное распределение плотности точечных дефектов, образующихся в поглощающем материале при лазерном облучении. Физика и химия обработки материалов, 1976, № 2, с. 3 – 6.
10. Tsepelev A.B., Ivanov L.I., Poymenov I.L. Miniaturized disk bend tests of electron irradiated stainless steels. In: Miniaturized specimens for testing of irradiated materials. Eds. P.Jung, H.Ulmaier. Proc. IEA Int. Symp., 22 – 23 Sept. 1994, Julich, Germany. Forschungszentrum Julich GmbH, 1995, p. 59 – 78.
11. Масляев С.А. Численное моделирование ударных волн в твердом теле при воздействии концентрированных

- потоков энергии. Физика и химия обработки материалов, 2013, № 5, с. 5 – 9.
12. Мезох З.И., Янушкевич В.А., Иванов Л.И. Образование точечных дефектов в Ni при воздействии гигантских импульсов ОКГ. Физика и химия обработки материалов, 1971, № 4, с. 163 – 165.
 13. Пруцков Е.Г., Никифоров Ю.Н., Янушкевич В.А. О природе дефектов в *n*-Si, облученном мощным лазерным импульсом. Физика и техника полупроводников, 1981, т. 15, вып. 8, с. 1620 – 1622.
 14. Иванов Л.И., Литвинова Н.А., Янушкевич В.А. Глубина образования ударных волн при воздействии лазерного излучения на поверхность монокристалла молибдена. Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 1, с. 204 – 206.
 7. Bondarenko G.G., Ivanov L.I., Yanushkevich V.A. Vozdeystvie gigantskikh bmpulsov lazera na mikrostrukturu aluminiya [Effect of laser giant pulses on microstructure of aluminum]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment* (in Rus), 1973, no. 4, pp. 19 – 21.
 8. Larikov L.N., Filchenko V.M., Mazanko V.F. Anomalnoe uskorenie diffuzii pri impulsnom nagruzhennii metallov [Anomalous diffusion enhancement under pulsed loading of metals]. Reports of the Academy of Sciences of the USSR, ser.: Mathematics and Physics, 1975, vol. 221, no. 5, pp. 1073 – 1075. (In Rus).
 9. Ivanov L.I., Litvinova N.A., Yanushkevich V.A. Anomalnoe raspredelenie plotnosti tochechnykh defektov obrazuyushchikhsya v pogloshchayushchem materiale pri lasernom obluchenii [Anomalous distribution of the density of point defects formed in absorbing material under laser irradiation]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment* (in Rus), 1976, no. 2, pp. 3 – 6.
 10. Tsepelev A.B., Ivanov L.I., Poymenov I.L. Miniaturized disk bend tests of electron irradiated stainless steels. In: Miniaturized specimens for testing of irradiated materials. Eds. P.Jung, H.Ulmaier. Proc. IEA Int. Symp., 22 – 23 Sept. 1994, Julich, Germany. Forschungszentrum Julich GmbH, 1995, pp. 59 – 78.
 11. Maslyayev S.F. Chislennoe modelirovanie udarnykh voln v tverdom tele pri vozdeystvii kontsentrirrovannykh potokov energii [Numerical simulation of the shock waves in solid induced by concentrated energy fluxes]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment* (in Rus), 2013, no. 5, pp. 5 – 9.
 12. Mezokh Z.I., Yanushkevich V.A., Ivanov L.I. Obrazovanie tochechnykh defektov v Ni pri vozdeystvii gigantskikh impulsov OKG [Formation of point defects in Ni under the action of laser giants pulses]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment* (in Rus), 1971, no. 4, pp. 163 – 165.
 13. Prutskov E.G., Nikiforov Yu.N., Yanushkevich V.A. O prirode defektov v *n*-Si obluchennom moshchnym lazernym impulsom [On the nature of the defects in *n*-Si irradiated with power laser pulse]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov — Physics and engineering of semiconductors* (in Rus), 1981, vol. 15, iss. 8, pp. 1620 – 1622.
 14. Ivanov L.I., Litvinova N.A., Yanushkevich V.A. Glubina obrazovaniya udarnykh voln pri vozdeystvii lazernogo izlucheniya na poverkhnost monokristalla molibdena [Depth of the shock wave formation under the action of laser radiation on the surface of the single crystal of Mo]. *Kvantovaya elektronika — Quantum electronics* (In Rus), 1977, vol. 4, no. 1, pp. 204 – 206.

References

Статья поступила в редакцию 20.07.2015 г.

Цепелев Аркадий Борисович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Москва, Ленинский проспект, д. 49), доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409 Москва, Каширское ш., 31), профессор, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: tsep@imet.ac.ru.

Казилин Евгений Евгеньевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Москва, Ленинский проспект, д. 49), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области радиационного и космического материаловедения.

Масляев Сергей Алексеевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Москва, Ленинский проспект, д. 49), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: maslyayev@mail.ru.

Мельников Владимир Николаевич — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (119991, Москва, Ленинский проспект, д. 49), старший научный сотрудник, специалист в области радиационного материаловедения.

Садыхов Сабир Иманович — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (119991, Москва, Ленинский проспект, д. 49), старший научный сотрудник, специалист в области радиационного материаловедения.

Виноградова Наталья Александровна — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (119991, Москва, Ленинский проспект, д. 49), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, специалист в области радиационного и космического материаловедения. E-mail: na_vin@mail.ru.

Athermal laser annealing of a cold-worked aluminum

**A. B. Tsepelev, E. E. Kazilin, S. A. Maslyaev, V. N. Melnikov,
S. I. O. Sadykhov, N. A. Vinogradova**

Effect of pulsed laser irradiation on mechanical properties of annealed and cold-worked pure aluminum has been investigated. The tests were conducted by Miniaturized Disk Bend Test technique with the use of disk specimens of 3 mm in diameter. It was found the laser exposure does not effect on the mechanical properties of annealed specimens but leads to softening effect for cold-worked ones. Almost full recovery of the cold-worked Al strength to the value of that for annealed Al is found to be took place after specimens exposure to 100 laser pulses. Laser irradiation does not effect on plasticity of cold-worked Al. Estimations of possible contribution of the thermal and shock-wave mechanisms of laser irradiation in the property changes were carried out. It was concluded that the main reason for laser-induced softening effect observed in cold-worked Al is propagation of acoustic waves in the volume of specimens which stimulates the process of athermal annealing and recovery of dislocation structure.

Keyword: pulsed laser irradiation, aluminum, mechanical properties, MDBT technique, dislocation rearrangement, athermal annealing.

***Tsepelev Arkady** — A.A. Baikov Institute of metallurgy and materials science of the Russian Academy of Sciences (49 Leninsky pr., 119991 Moscow, Russia), DrSci (Phys.Math.), leading scientist; National Research Nuclear University “MEPhI” (31 Kashirskoe shosse, 115409 Moscow, Russia), professor; authority in the field of solid state physics and radiation material science. E-mail: tsep@imet.ac.ru.*

***Kazilin Evgeniy** — A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of the Russian Academy of Sciences (49 Leninsky pr., 119991 Moscow, Russia), PhD, senior scientist; authority in the field of radiation material science and laser treatment of materials.*

***Maslyaev Sergey** — A.A. Baikov Institute of metallurgy and materials science of the Russian Academy of Sciences (49 Leninsky pr., 119991 Moscow, Russia), PhD, senior scientist; authority in the field of cosmic and radiation material science. E-mail: maslyaev@mail.ru.*

***Melnikov Vladimir** — A.A. Baikov Institute of metallurgy and materials science of the Russian Academy of Sciences (49 Leninsky pr., 119991 Moscow, Russia), senior scientist; authority in the field of radiation material science.*

***Sadykhov Sabir** — A.A. Baikov Institute of metallurgy and materials science of the Russian Academy of Sciences (49 Leninsky pr., 119991 Moscow, Russia), senior scientist; authority in the field of radiation material science.*

***Vinogradova Natalia** — A.A. Baikov Institute of metallurgy and materials science of the Russian Academy of Sciences (49 Leninsky pr., 119991 Moscow, Russia), PhD, senior scientist; authority in the field of cosmic and radiation material science. E-mail: na_vin@mail.ru.*