

06

Динамическая прочность титанового сплава с модифицированной электронным пучком поверхностью

© Г.Г. Савенков,^{1,2} А.В. Кузнецов,¹ А.М. Брагов³

¹ Машиностроительный завод „Армалит“,
198097 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),
190013 Санкт-Петербург, Россия

³ Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: sav-georgij@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 13 февраля 2017 г.)

Представлены результаты плосковолновых экспериментов по определению динамической прочности титанового сплава ЗМ с обработанной электронным пучком микросекундной длительности поверхностью. Показано, что динамическая прочность образцов с обработанной поверхностью выше, чем у образцов без обработки. Металлографический анализ испытанных образцов выявил макрооткольные явления в толще необработанных образцов и микрооткольные явления на границе раздела упрочненного слоя с подложкой в обработанных пучком образцах.

DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45903.2205

Введение

С конца XX в. и по настоящее время при изготовлении конструкций из металлов и сплавов, работающих в условиях экстремальных внешних воздействий, в том числе в агрессивных средах, широкое распространение получили методы обработки поверхности изделий концентрированными потоками энергии. К таким методам относятся методы газотермического напыления, лазерная и электронно-пучковая обработка.

Концентрированные потоки энергии (КПЭ), которые создаются импульсными электронными пучками, воздействуя на поверхность деталей, способствуют быстрым структурно-фазовым превращениям в приповерхностных слоях металла. При определенном подборе параметров пучков без нагрева глубоких слоев металла, не вызывая напряжений, деформаций и изменений геометрических размеров, например, можно добиться резкого увеличения износостойкости детали [1] путем упрочнения ее поверхностного слоя.

Суть метода модификации заключается в следующем. При воздействии мощных импульсных электронных пучков на материал его слой толщиной порядка длины пробега электронов в данном материале (от 10 до 100 мкм) очень быстро нагревается до температуры фазовых переходов. По окончании импульсного воздействия за счет теплопроводности в глубину материала нагретый слой быстро охлаждается.

В результате электронно-пучкового воздействия изменяются свойства поверхностного слоя:

1. Изменяется микроструктура — размер зерна уменьшается от сотен микрон до долей микрона, возможен переход в аморфное состояние и формирование наноструктур. Достаточно резко повышается микротвердость слоя по отношению к подложке.

2. Изменяется фазовый состав, при этом возможно появление метастабильных фаз и соединений, которые при обычных методах термообработки образоваться не могут.

3. Гомогенизируется фазовый состав, например, измельчаются и однородно распределяются карбиды в сталях.

Таким образом, в результате модификации поверхности импульсным электронным пучком (ИЭП) получается своеобразный слоеный материал, свойства которого в общем случае могут отличаться от исходного. В связи с этим перед разработчиками изделий с обработанной ИЭП поверхностью, которые подвергаются ударным нагрузкам, встает проблема оценки влияния модификации поверхности материала на динамические свойства (в частности, на откольную прочность и откольную стойкость) материала в целом. Кроме этого, у металлургов и специалистов в области механики деформируемого твердого тела возникают вопросы фундаментального характера, связанные с влиянием упрочненного поверхностного слоя на процессы динамического деформирования и разрушения как в самом слое, так и в подложке. Именно поэтому настоящая работа посвящена всем вышеперечисленным аспектам поведения и свойств материалов (откольной прочности и стойкости) с модифицированной ИЭП поверхностью.

Таблица 1. Свойства титанового сплава 3М

Плотность ρ_0 , kg/m ³	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, GPa	Объемная скорость звука c_0 , m/s	$\sigma_{0,2}$, GPa	σ_b , GPa	δ_5 , %	ψ , %	HV, GPa
4540	0.3	112	4530	660 ± 10	715 ± 10	22 ± 1	36 ± 1	4.35 ± 0.26

Экспериментальные методики, материалы, режимы обработки

Исследование откольной прочности проводилось на установке ПГ-57 в плосковолновой постановке с использованием интерферометра VISAR для регистрации скорости свободной поверхности. Основой установки ПГ-57 является газовая пушка калибром 57 mm с двухдиафрагменным затвором, работающая на сжатом воздухе или гелии давлением до 15 МПа. Применение газовой пушки позволяет получать стабильные и легко контролируемые скорости соударения V_0 в диапазоне от 50 до 500 м/с.

В качестве источника излучения в интерферометре VISAR использовался одномодовый и одночастотный неодимовый лазер Verdy-2 фирмы Coherent (США) со встроенным удвоителем частоты. Длина волны излучения 0.53 μm .

Обработка полученных интерферограмм производилась только до появления первого минимума зависимости скорости откольной поверхности от времени (так называемого откольного импульса) [2]. По полученным зависимостям скорости свободной поверхности определялись максимум скорости свободной поверхности W_1 , минимальная скорость свободной поверхности W_2 перед началом откольного импульса, время спада скорости свободной поверхности от W_1 до W_2 . При проведении испытаний у некоторых образцов произошло выпучивание тыльной поверхности. Все остальные образцы были разрезаны для получения информации о наличии видимого откола (определялся по наличию магистральной трещины внутри образца) и его толщине.

Максимальные растягивающие напряжения σ_p и скорость деформации $\dot{\epsilon}$ определялись по формулам

$$\sigma_p = 0.5\rho_0 c_0 (W_1 - W_2),$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{c_0} \cdot \frac{\partial W_1}{\partial t},$$

где ρ_0 — плотность материала образца; c_0 — объемная скорость звука.

При наличии откола (магистральной трещины) σ_p соответствует откольной прочности. При наличии единичных микротрещин σ_p характеризует откольную стойкость материала. Отметим, что откол наблюдался только в образцах с необработанной поверхностью. В целом σ_p характеризует динамическую прочность материала.

Плоскостные эксперименты по определению откольной прочности проводились с образцами из титанового сплава 3М. Титановый сплав 3М относится к

группе термически неупрочняемых α -сплавов мартенситного класса средней прочности, допускающих упрочнение при закалке. Основные свойства исследуемого материала, необходимые для обработки динамических экспериментов, а также стандартные механические свойства, определенные на образцах из прутков, из которых впоследствии изготавливались все необходимые образцы для исследований, приведены в табл. 1. В последнем столбце табл. 1 приведены значения микротвердости, измеренные по высоте сечения плоского образца, толщиной 6 mm.

Испытывались образцы двух видов: образцы диаметром 30 mm и толщиной 4 mm, у которых поверхность, по которой наносился удар, была обработана электронным пучком и для сравнения толщиной 6 mm и диаметром 92 mm в исходном состоянии. Режим обработки образцов ИЭП состоял из восьми импульсов электронного пучка с плотностью энергии 18 J/cm² со средней длительностью каждого импульса 5 μs . Толщина модифицированного слоя 25 ± 15 μm . Микротвердость слоя HV = 4.89 ± 0.66 GPa, микротвердость подложки — HV = 4.29 ± 0.30 GPa.

Для размещения в узле крепления образцов установки подобные образцы помещались в обойму с внешним диаметром 92 mm, сделанную из того же материала, что и образцы (не обработанные электронным пучком). Тыльная поверхность всех образцов шлифовалась (но не полировалась) до получения матовой поверхности. Это позволило иметь достаточно контрастную интерференционную картину при небольших мощностях лазерного излучения (~ 20 –30 mW).

В качестве ударников использовались пластины из того же материала, что и исследуемые образцы. Толщина пластин-ударников составляла 3 mm для образцов толщиной 6 mm и 2 mm для образцов толщиной 4 mm. Пластины-ударники толщиной 2 mm имели также как и образцы, диаметр 30 mm и со стороны, которой наносился удар, также обрабатывались электронным пучком.

После динамических испытаний по определению откольной прочности испытанные образцы, у которых произошло отделение откольной тарелочки, разрезались вдоль диаметра и из них, а также уже из разрезанных образцов с откольной тарелочкой изготавливались металлографические шлифы. Травление образцов осуществлялось последовательным погружением в растворы плавиковой и азотной кислот. Для рассмотрения и фиксации структур, выявленных на шлифах проб мишеней, применялся световой микроскоп „Аксио Обсервер“.

Таблица 2. Результаты динамических испытаний

№	Обработка	V_0 , m/s	W_1 , m/s	W_2 , m/s	$\dot{\epsilon}$, s ⁻¹	σ_p , GPa
1	Без обработки	495	493	198	4.65	3.03
2		500	670*	299	5.2	3.82
3	С обработкой	411	415	163	4.9	2.6
4	фронтальной	438	440	266	4.8	1.8
5	поверхности ИЭП	484	480	142	5.4	3.4

Примечание: *Материал ударника — сталь 12Х18Н10Т.

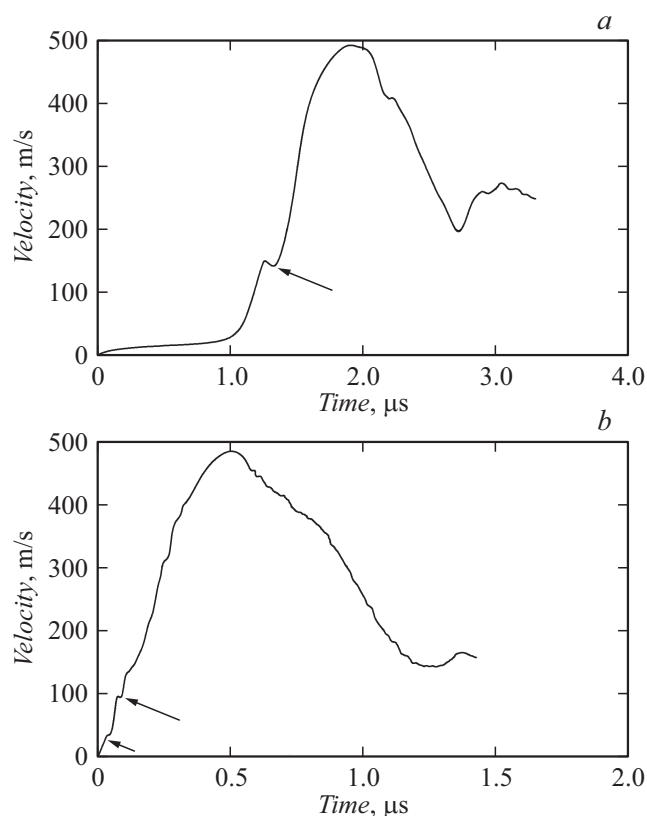


Рис. 1. Экспериментальные зависимости изменения скорости свободной поверхности образцов от времени: *a* — скорость удара 495 м/с, *b* — скорость удара 484 м/с.

Для определения значений микротвердости использовался микротвердомер „Аффри“, замеры микротвердости осуществлялись при нагрузке на индентор усилия 50 г.

Результаты плосковолновых экспериментов и их обсуждение

Результаты экспериментов по определению откольной прочности сведены в табл. 2. На рис. 1 представлены примеры экспериментальных зависимостей изменения скорости свободной поверхности образцов от времени.

При анализе полученных результатов обращают на себя внимание следующие факты:

1. Несмотря на достаточно узкий диапазон изменений начальной скорости удара и скорости деформации наблюдается тенденция увеличения динамической прочности с увеличением двух указанных параметров процесса.

2. Значения максимальных растягивающих напряжений образцов с обработанной поверхностью на 10–20% ниже, чем у образцов с необработанной поверхностью, для которых σ_0 является и откольной прочностью. Однако даже этот результат нельзя считать абсолютно достоверным, поскольку при расчете σ_p для обработанных образцов пользовались теми же значениями ρ_0 и c_0 , а они могут быть: плотность незначительно выше, а c_0 более выше, чем в случае необработанных образцов [3].

3. Обращает на себя внимание более чем на 30% снижение значения σ_p в эксперименте 4, объяснение этого экспериментального факта будет дано в следующем разд. 3 настоящей работы.

4. На многих профилях скорости свободной поверхности образцов как с обработанной поверхностью, так и с необработанной (в том числе и в экспериментах, которые не приведены в таблице) в интервале скоростей 150–200 м/с обнаружены некие зубцы (показаны большими стрелками на рис. 2). Каждый из зубцов внешне похож на зуб текучести в малоуглеродистых сталях и в ОЦК-металлах [4]. Возможно, эти зубцы связаны с осцилляциями фронта пластической волны, которые

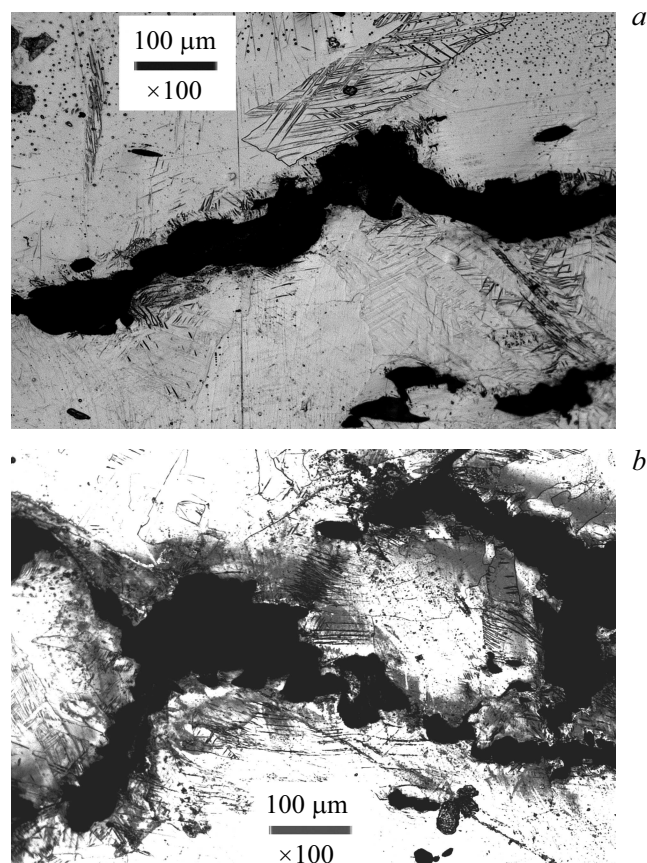


Рис. 2. Несплошности в образцах после удара со скоростью 495 (*a*) и 500 м/с (*b*).

наблюдались в работах [5,6]. В указанных работах такие осцилляции объяснялись с точки зрения особенностей пластической деформации, осуществляющейся за счет гетерогенного размножения дислокаций или движения диполей частичных дисклинаций. Вероятно, возможны и другие объяснения этого явления.

5. На профилях скорости свободной поверхности образцов с обработанной поверхностью видны небольшие уступы (показан пример на рис. 1, *b* малой стрелкой), которые могут быть связаны с тем, что в случае обработанной поверхности могут изменяться механизмы упругой и пластической деформации. Такие изменения могут быть связаны, например, с появлением неких высокоскоростных кооперативных атомных перемещений или дополнительных одиночных дефектов и др.

Результаты исследования структур и их обсуждение

Прежде всего на протравленных образцах были произведены замеры микротвердости по всей высоте исследуемого образца. Такую микротвердость, являющуюся следствием ударного нагружения, в дальнейшем будем называть наведенной микротвердостью. Для каждого образца было произведено не менее десяти замеров. Полученные результаты сведены в табл. 3.

Анализ результатов, приведенных в табл. 3, показал:

1. Ударное нагружение образцов в целом привело к их упрочнению. Исключение составляет образец 4, где микротвердость осталась практически на исходном уровне.

2. Откольная прочность образцов и максимальные растягивающие напряжения коррелируют со средней наведенной микротвердостью материала образцов: чем выше значения последней, тем выше значения σ_p (практически линейная зависимость). Таким образом, находит объяснение факт уменьшения максимальных растягивающих напряжений σ_p для образца 4.

Металлографические исследования структур образцов показали, что откольные явления имели место только в образцах с необработанной поверхностью, в которых приблизительно на расстоянии 2 мм от тыльной (свободной) поверхности наблюдалось зарождение откольной щели (магистральная трещина отсутствовала) в виде

Таблица 3. Откольная прочность и максимальные растягивающие напряжения и микротвердость исследованных образцов

№	Обработка	V_0 , m/s	σ_p , GPa	HV, GPa
1	Без обработки	495	3.03	5.00 ± 0.30
2		500	3.82	5.80 ± 0.35
3	С обработкой	411	2.6	4.80 ± 0.25
4	фронтальной	438	1.8	4.10 ± 0.20
5	поверхности ИЭП	484	3.4	5.70 ± 0.29

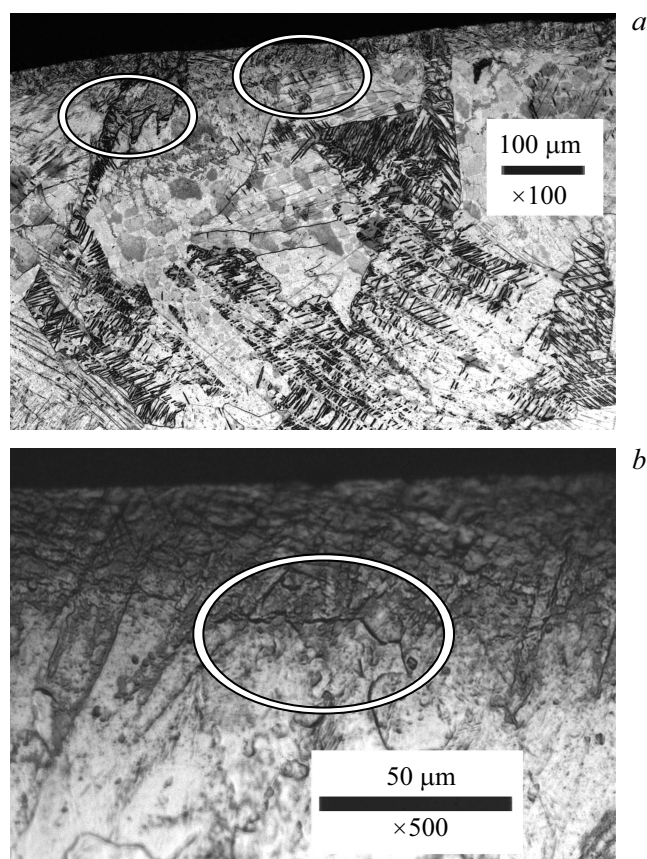


Рис. 3. Квазипериодический рельеф из микротрещин в образцах после удара со скоростью 438 (*a*) и 484 м/с (*b*).

либо отдельных трещин мезомакромасштабного уровня, либо скопления трещин (рис. 2).

Для образцов с обработанной поверхностью таких нарушений сплошности образцов не наблюдалось. Однако у границы раздела упрочненного слоя с подложкой наблюдался квазипериодический с шагом $\sim 2 \mu\text{m}$ микрорельеф, сформированный из микротрещин указанного размера (рис. 3).

Такой рельеф, вероятно, является микрооткольной щелью между упрочненным слоем и подложкой, что связано с различиями в их значениях акустического импеданса. В этом случае волна сжатия с амплитудой на фронте $p_0 = \left(\frac{R_0 R_1}{R_0 + R_1}\right) V_0$ и массовой скоростью $U_0 = \left(\frac{R_0}{R_0 + R_1}\right) V_0$ (здесь $R_{0,1}$ — соответствующие импедансы ударника и упрочненного слоя), сформировавшаяся в момент удара по фронтальной обработанной поверхности, пройдя упрочненный слой, войдет в подложку, и от границы раздела в обе стороны будет распространяться с отличным от p_0 пиковым давлением и массовой скоростью, отличной от V_0 . В конечном итоге интерференция волн разрежения от фронтальной поверхности вызовет некоторое подобие микрооткола. В целом же, наличие упрочненного слоя приводит к дис-

сипации механической энергии первоначальной ударной волны, чем и объясняется отсутствие макрооткольных процессов в толще образца.

Заключение и выводы

Анализ эффектов, связанных с наличием упрочненного импульсным электронным пучком микросекундной длительности поверхностным слоем в титановом сплаве 3М, приводит к следующим выводам:

1. Динамическая прочность образцов из титанового сплава 3М с обработанным импульсным электронным пучком поверхностным слоем выше, чем у образцов без обработанной поверхности.

2. Динамическая прочность исследованного материала (независимо от обработки поверхностного слоя) растет с увеличением скорости деформации. Динамическая прочность также коррелирует со средней наведенной микротвердостью образцов: чем она выше, тем выше динамическая прочность материала.

3. Небольшие уступы (соответствуют малым длительностям процесса (до 200 ns)) на профилях скорости свободной поверхности образцов с обработанной поверхностью с некоторой долей вероятности связаны с тем, что в случае обработанной поверхности изменяются механизмы упругой и пластической деформации. В частности, могут проявиться высокоскоростные кооперативные атомные перемещения или некие эффекты мезоскопического масштабного уровня.

4. Аналоги зуба текучести в малоуглеродистых сталях и в ОЦК-металлах, проявляющиеся на полученных профилях скорости свободной поверхности в виде зубцов, могут быть связаны с осцилляциями фронта пластической волны. Однако не отрицаются и другие (не выявленные) причины появления указанных зубцов.

Список литературы

- [1] Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
- [2] Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под общей ред. А.Г. Иванова. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2001. 482 с.
- [3] Судьенков Ю.В. Особенности ударноволнового процесса в твердых телах вблизи поверхности высокоскоростного нагружения // Проблемы динамических процессов в гетерогенных средах. Калинин: Изд-во Калининского гос. ун-та, 1987. С. 120–126.
- [4] Кристал М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Ч. I. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. № 5. С. 5–29.

- [5] Байзаков О.Д., Макаревич И.П., Морозов В.А., Судьенков Ю.В. Осцилляции пластического течения в металлах за фронтом упругого предвестника // Проблемы динамических процессов в гетерогенных средах. Калинин: Изд-во Калининского гос. ун-та, 1987. С. 127–132.
- [6] Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 6. С. 17–123.