

## Глава 4. ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЯЗКИХ МЕТАЛЛОВ С МОДИФИЦИРОВАННЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

<sup>1,2</sup>Савенков Г.Г., <sup>2</sup>Кузнецов А.В.

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет), г. Москва, Россия, E-mail: sav-georgij@yandex.ru

<sup>2</sup>АО «Машиностроительный завод «Армалит»,  
г. Санкт-Петербург, Россия, E-mail: avkuznecov77@mail.ru

### Введение

Основные технические требования, предъявляемые к металлическим изделиям и деталям, которые работают в условиях экстремальных внешних воздействий (динамических нагрузок, интенсивных фрикционных взаимодействий), в том числе в агрессивных средах, сводятся к их надёжности и прочности. Практика показывает, что случаи нарушения прочности деталей (и изделий в целом) в виде больших остаточных пластических деформаций и макротрещин являются сравнительно редким исключением и для правильно спроектированных образцов могут произойти лишь в результате не выявленных технологических дефектов, допущенных при их изготовлении, а также вследствие отступлений от нормальных условий эксплуатации. Как общее правило, решающей характеристикой уменьшения надёжности деталей (изделий), работающих в вышеназванных условиях, является износ их трущихся поверхностей, приводящий к тому, что частично разрушенные элементы поверхности детали перестают исполнять своё назначение. Поэтому особое значение для таких деталей имеют трибологические, прочностные и другие физико-механические свойства поверхностного слоя. С целью повышения уровня указанных свойств достаточно часто применяется поверхностная обработка материалов концентрированными потоками энергии (КПЭ), приводящая к модификации поверхностного слоя. Из всех типов КПЭ (лазерный, плазменный, электронный и др.) импульсный электронно-пучковый способ обработки поверхности является одним из наиболее перспективных.

Электронно-пучковая обработка (ЭПО), сопровождающаяся сверхвысокими скоростями нагрева и охлаждения, малой длительностью термического воздействия, создают условия для образования в облучаемом материале неравновесных структурно-фазовых состояний. Последние характеризуются высоким уровнем дисперсности элементов субструктуры, большей плотностью дефектов материала по сравнению с его исходным состоянием, значительным градиентом концентрации легирующих элементов и др. [1–3]. Всё это приводит к устранению микротрещин и микропор в поверхностном слое, к увеличению его микротвёрдости и, как следствие, к резкому увеличению износостойкости материала детали. Кроме того, при некоторых (в дальнейшем будем называть оптимальными) режимах ЭПО удаётся существенно снизить шероховатость поверхности и тем самым улучшить её фрикционные свойства.

Таким образом, в результате модификации поверхности импульсным электронным пучком (ИЭП) получается своеобразный слоёный 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, встаёт проблема оценки влияния модификации поверхности материала на динамические свойства (например, на откольную прочность) материала в целом. Кроме этого, у металловедов и специалистов в области механики деформируемого твёрдого тела возникают вопросы фундаментального характера, связанные с влиянием упрочнённого поверхностного слоя на процессы динамического деформирования и разрушения как в самом слое, так и в подложке. В настоящей главе мы попытаемся осветить все вышеперечисленные аспекты выбора оптимальных режимов ЭПО, а также поведения и свойств металлов (динамической (откольной) прочности) с модифицированной ИЭП поверхностью.

## 1. Выбор оптимальных режимов электронно-пучковой обработки для вязких металлических сплавов и исследование образцов

### 1.1. Исследуемые металлические сплавы и их физико-механические свойства

Исследования проводились с образцами из титанового сплава 3М, нержавеющей стали 08Х18Н10Т и бронзы марки БрАЖНМц9-4-1-1

Титановый сплав 3М относится к группе термически неупрочняемых  $\alpha$ -сплавов мартенситного класса средней прочности, допускающих упрочнение при закалке. Коррозионно-стойкая жаропрочная сталь 08Х18Н10Т относится к сталям аустенитного класса. Бронза марки БрАЖНМц9-4-1-1 относится к классу алюминиевых бронз полифазного строения, в которых, в зависимости от состава легирования и примененной термической обработки, могут сосуществовать пластичная  $\alpha$ -фаза (твердый раствор алюминия в меди),  $\gamma$ -выделения дисперсных электронных соединений типа  $\text{Cu}_3\text{Al}_m$  и  $\beta$ -высокотемпературный твердый раствор.

Основные свойства исследуемых материалов, необходимые для обработки динамических экспериментов, а также стандартные механические свойства, определённые на образцах из прутков, из которых впоследствии изготавливались все необходимые образцы для исследований, приведены в таблице 1. В таблице 1 также приведены данные по микротвёрдости и коэффициентам трения, полученные на образцах, предназначенных для установления оптимальных режимов ЭПО их поверхностей. Разброс значений для всех характеристик не превышал 3–5%.

Таблица 1 – Свойства исследуемых материалов

Плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэфф-т трения	Модуль Юнга, ГПа	Объёмная скорость звука $c_0$ , м/с	$\sigma_{0,2}$ , ГПа	$\sigma_b$ , ГПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	HV, ГПа
Титановый сплав 3М								
4540	0,201	112	4530	660	715	22	36	1,5
Сталь 08Х18Н10Т								
7890	0,190	190	4720	275	595	59	70	1,65
Бронза БрАЖНМц9-4-1-1								
7920	0,121	110	3930	385	725	35	36	1,1

Примечание: микротвердость измерялась при нагрузке на индентор 10 (бронза) и 20 грамм (титан и сталь).

### 1.2. Методология выбора оптимальных режимов ЭПО

Алгоритм проведения работ по выбору оптимальных режимов ЭПО состоит из ряда следующих последовательных действий.

С помощью компьютерной программы «Орион» (или любой другой программы, позволяющей рассчитывать те же самые процессы) проводятся расчёты режимов воздействия (нагрева и плавления) импульсного электронного пучка микросекундной длительности на плоскую поверхность исследуемых образцов. При этом необходимо учитывать, что для реализации процесса модификации электронный пучок должен обеспечить плавление поверхностных слоев материалов на глубину десятки микрон со скоростью нагрева (108–109) К/с. При этом предпочтительнее нагревать обрабатываемый слой без заметного вскипания расплавленной фазы, а также без значительных потерь энергии на теплопроводность внутрь массы материала, т.е. в режиме так называемого адиабатического нагрева. В нашем случае расчёты показали, что при кинетической энергии электронов порядка 100–200 кэВ (нами выбрана средняя энергия электронов в пучке 120 кэВ), плотность энергии пучка и максимальная длительность импульса, при которых обеспечиваются условия для адиабатического нагрева обрабатываемого слоя, лежат в пределах 15–40 Дж/см<sup>2</sup> и длительностью импульса тока от единиц до десятков микросекунд. Микросекундный диапазон длительности импульса удобен для управления параметрами пучка за счет изменения длительности импульса. Он также необходим для достижения требуемой плотности

энергии в случае, когда камера обработки отделена от инжектора электронов каналом дрейфа, который ограничивает максимально достижимый ток пучка.

Проводится обработка поверхности образцов по рассчитанным для каждого материала индивидуальным режимам (по три режима для каждого, варьируется поверхностная плотность энергии). После обработки поверхности проводятся необходимые исследования обработанных образцов (определяются: шероховатость поверхностного слоя, его толщина, микроструктура, коэффициент трения, коэффициент истирания). На основании полученных результатов корректируются режимы обработки.

Проводится обработка поверхности образцов по уточненным режимам. На данном этапе для каждого материала обработка также происходит по нескольким режимам (как правило, 2 режима). Далее проводятся исследования обработанных образцов аналогично предыдущему пункту. На основании таких исследований производится выбор оптимального режима обработки поверхности с помощью ИЭП;

И, наконец, производится обработка поверхности образцов по оптимальному режиму ЭПО и проводятся расширенные исследования обработанных образцов (дополнительно определяются коэффициент износа материалов, и зависимость коэффициента трения от времени истирания).

### 1.3. Выбранные оптимальные режимы ЭПО. Результаты исследования образцов, обработанных по оптимальному режиму ЭПО

В результате проведенных работ, описанных в разделе 1.2, были определены следующие оптимальные режимы ЭПО для каждого исследуемого материала.

Для титанового сплава 3М: 8 импульсов длительностью 25 мкс с плотностью потока энергии 18 Дж/см<sup>2</sup> при средней энергии электронов в пучке 120 кэВ.

Для стали 08X18H10T: 5 импульсов длительностью 15 мкс с плотностью потока энергии 18 Дж/см<sup>2</sup> и 2 импульса длительностью 20 мкс с плотностью потока энергии 30 Дж/см<sup>2</sup> при средней энергии электронов в пучке 120 кэВ (во всех случаях).

Для бронзы марки БрАЖНМц9-4-1-1: 4 импульса длительностью 20 мкс с плотностью потока энергии 18 Дж/см<sup>2</sup> и 2 импульса длительностью 30 мкс с плотностью потока энергии 30 Дж/см<sup>2</sup> при средней энергии электронов в пучке 120 кэВ (во всех случаях).

На рисунке 1 представлены микроструктуры образцов с обработанным по оптимальным режимам поверхностным слоем, а на рисунке 2 – их внешний вид.

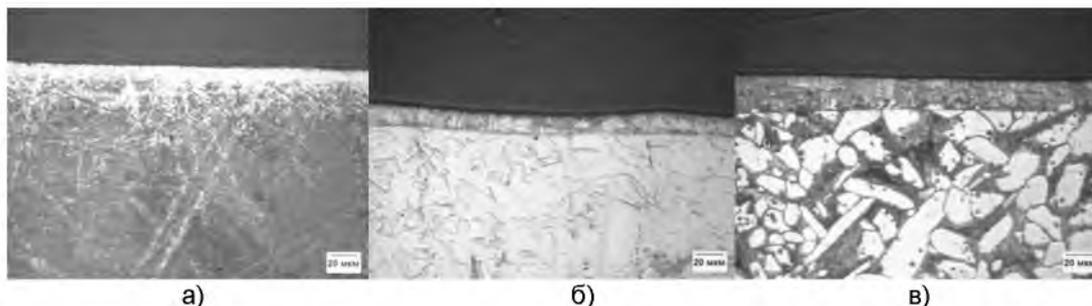


Рисунок 1 – Структуры модифицированного слоя образца из титанового сплава 3М (а), стали 08X18H10T (б) и бронзы БрАЖНМц9-4-1-1 (в) после облучения по оптимальным режимам

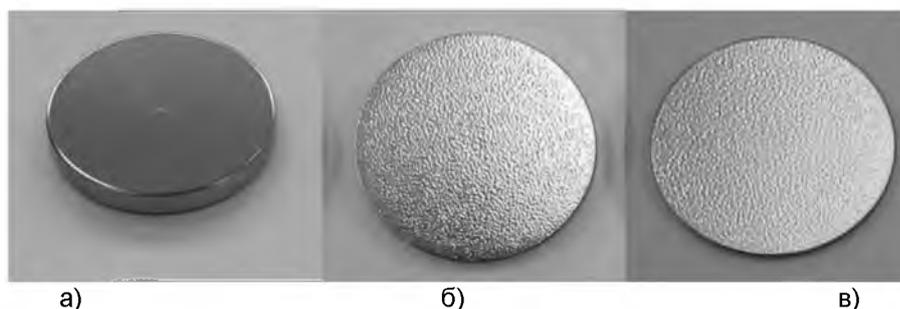


Рисунок 2 – Внешний вид образца из сплава 3М (а), стали (б) и бронзы (в)

По результатам исследования образцов, обработанных по оптимальным режимам ЭПО, можно сформулировать следующие выводы:

Толщина модифицированного поверхностного слоя для всех видов исследованных вязких металлических сплавов находится в диапазоне 15–30 мкм;

После обработки электронным пучком в оптимальных режимах шероховатость  $R_a$  поверхности образцов из титана 3М уменьшается в 2–3 раза, а для образцов из стали 08Х18Н10Т и бронзы БрАЖНМц увеличивается до 2 раз;

У сформированных модифицированных слоев значения микротвердости выше по сравнению с основой на 15–25% для титана 3М и нержавеющей стали 08Х18Н10Т и до 50% для бронзы БрАЖНМц;

Износостойкость модифицированных слоев образцов, обработанных по оптимальным режимам, выше по сравнению с основой в 1,5–1,6 раз для бронзы БрАЖНМц и титана 3М, и как минимум в 1,15 раз для нержавеющей стали 08Х18Н10Т. При этом коэффициент трения меньше по сравнению с основой в 1,6 раза для титана 3М, в 1,17 раза для нержавеющей стали 08Х18Н10Т и в 1,1 раза для бронзы БрАЖНМц.

## 2. Методика динамических испытаний и условия проведения экспериментов

Исследование динамической (откольной) прочности образцов проводилось на установке ПГ-57 (рис.3) в плосковолновой постановке с использованием интерферометра VISAR для регистрации скорости свободной поверхности. Основой установки ПГ-57 является газовая пушка калибром 57 мм 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.

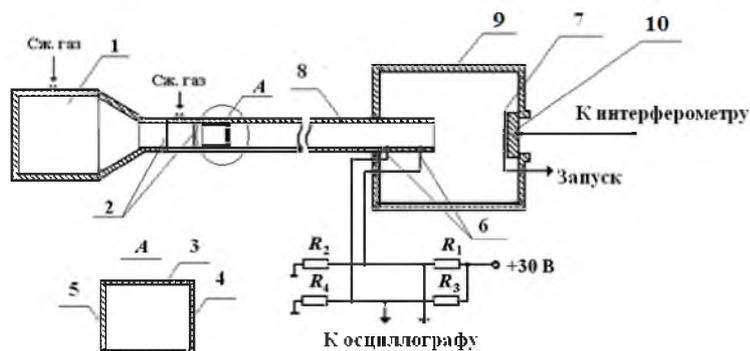


Рисунок 3 – Схема установки для исследования соударения пластин: 1 – газовая пушка, 2 – двухдиафрагменный затвор, 3 – ударник, 4 – пластина-ударник, 5 – дно стакана, 6 – электроконтактные датчики, 7 – запускаящий контакт, 8 – ствол пушки, 9 – вакуумная камера, 10 – исследуемый образец

Ударник представляет собой тонкостенный стакан из полипропилена (толщина стенки 3 мм), внешний диаметр стакана составлял 56,8 мм, а длина 70 мм. К переднему краю стакана приклеивалась пластина-ударник диаметром 56 мм из необходимого материала. Для предотвращения отрыва пластины-ударника от полипропиленового стакана к его задней части приклеивалось дно из сплава Д16Т толщиной 2 мм.

Скорость ударника определяется с помощью двух электроконтактных датчиков, расположенных в отверстиях ствола, высверленных перед его дульным срезом. Контакты изготавливаются из кусков изолированного медного провода диаметром 0,5 мм и подключаются к источнику питания напряжением 30 В через делители напряжения  $R_1/R_2$  и  $R_3/R_4$ . Временной интервал между сигналами с электроконтактных датчиков регистрируется осциллографом TektronixTDS 2024. На поверхности образца расположен запускаящий контакт, замыкающийся при ударе стакана по исследуемому образцу. Сигнал с него также регистрируется осциллографом TektronixTDS 2024.

Расстояние между контактами измерителя скорости составляет 750 мм и определяется с точностью 0,5 мм, запускающий контакт отстоит от второго контакта измерителя на 110 мм, что позволяет измерять скорость удара на двух независимых отрезках. Соударение происходит в вакуумной камере, к которой присоединен ствол пушки и в которую вставляется исследуемый образец.

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 мкм.

Обработка полученных интерферограмм производилась только до появления первого минимума зависимости скорости откольной поверхности от времени (так называемого откольного импульса) [4]. 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 отделение откольной пластины. 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  $\sigma_p$  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  $\rho_0$  – плотность материала образца;  $c_0$  – объемная скорость звука.

При наличии откола  $\sigma_p$  соответствует откольной прочности. Отметим, что откол наблюдался только в образцах с необработанной поверхностью. В целом,  $\sigma_p$  характеризует динамическую прочность материала.

В процессе проведения экспериментальных исследований испытывались образцы двух видов: толщиной 6 мм и диаметром 92 мм в исходном состоянии и образцы диаметром 30 мм и толщиной 4 мм, у которых поверхность, по которой наносился удар, была обработана ИЭП по оптимальному режиму. Для размещения в узле крепления образцов установки подобные образцы помещались в обойму с внешним диаметром 92 мм, сделанную из того же материала, что и образцы (но не обработанного ИЭП). 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 мВт).

В качестве ударников использовались пластины из того же материала, что и исследуемые образцы. Толщина пластин-ударников составляла 3 мм для образцов толщиной 6 мм и 2 мм для образцов толщиной 4 мм. Пластины-ударники толщиной 2 мм имели так же, как и образцы, диаметр 30 мм, и со стороны, по которой наносился удар, также обрабатывались электронным пучком. Для того, чтобы приклеить данные пластины-ударники к полипропиленовому стакану, они помещались в специальную обойму из того же материала с внешним диаметром 56 мм. В экспериментах регистрировались скорость свободной поверхности (тыльной) образца  $W(t)$ , подвергнутого удару пластины-ударника и скорость удара  $V_0$ .

При проведении испытаний установка не вакуумировалась. Влияние воздушной подушки перед ударником прослеживается в виде пологого участка в начале профиля скорости свободной поверхности.

### 3. Основные результаты ударных экспериментов и их обсуждение

#### Титановый сплав 3М

Результаты экспериментов по определению динамической прочности сведены в таблицу 2. На рисунке 4 представлены примеры экспериментальных зависимостей изменения скорости свободной поверхности образцов от времени.

Таблица 2 – Результаты динамических испытаний титанового сплава ЗМ

№	Обработка	$V_0$ , м/с	$W_1$ , м/с	$W_2$ , м/с	$\dot{\epsilon}$ , с <sup>-1</sup>	$\sigma_p$ , ГПа
1	Без обработки	495	493	198	$4.65 \cdot 10^4$	3.03
2		500	670*	299	$5.2 \cdot 10^4$	3.82
3	С обработкой фронтальной поверхности ИЭП	411	415	163	$4.9 \cdot 10^4$	2.6
4		438	440	266	$4.8 \cdot 10^4$	1.8
5		484	480	142	$5.4 \cdot 10^4$	3.4

Примечание: \* материал ударника – сталь 08Х18Н10Т.

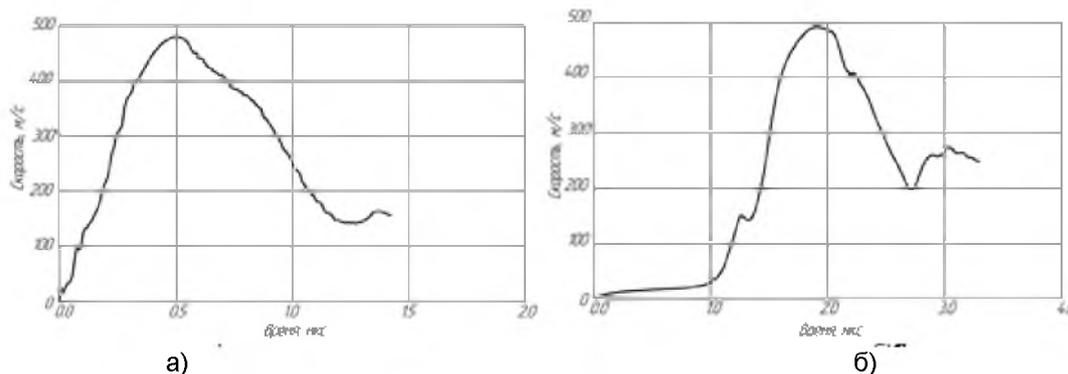


Рисунок 4 – Зависимость скорости свободной поверхности от времени в экспериментах 1 (а) и 3 (б)

При анализе полученных результатов обращают на себя внимание следующие факты:

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

Значения максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_p$  образцов с обработанной поверхностью на 10–20% ниже, чем у образцов с необработанной поверхностью, для которых  $\sigma_p$  является и откольной прочностью. Однако даже этот результат нельзя считать абсолютно достоверным, поскольку при расчёте  $\sigma_p$  для обработанных образцов пользовались теми же значениями  $\rho_0$  и  $c_0$ , а они могут быть: плотность незначительно выше, а  $c_0$  существенно выше, чем в случае необработанных образцов [5];

Обращает на себя внимание более чем 30%-ое снижение значения  $\sigma_p$  в эксперименте 4, объяснение данного экспериментального факта будет дано в разделе настоящей работы;

На многих профилях скорости свободной поверхности образцов, как с обработанной поверхностью, так и с необработанной, в интервале скоростей 150–200 м/с обнаружены некие зубцы. Каждый из зубцов внешне похож на зуб текучести в малоуглеродистых сталях и в ОЦК-металлах [6]. Возможно, эти зубцы связаны с осцилляциями фронта пластической волны, которые наблюдались в работах [7,8]. В указанных работах такие осцилляции объяснялись с точки зрения особенностей пластической деформации, осуществляющейся за счёт гетерогенного размножения дислокаций или движения диполей частичных дисклинаций. Вероятно, возможны и другие объяснения этого явления;

На профилях скорости свободной поверхности образцов с обработанной поверхностью видны небольшие уступы, 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.

**Сталь 08X18H10T**

Результаты экспериментов по определению динамической прочности сведены в таблицу 3. На рисунке 5 представлены примеры экспериментальных зависимостей изменения скорости свободной поверхности образцов от времени.

Таблица 3 – Результаты динамических испытаний стали 08X18H10T

№	Обработка	$V_0$ , м/с	$W_1$ , м/с	$W_2$ , м/с	$\dot{\epsilon}$ , с-1	$\sigma_p$ , ГПа
1	Без обработки	309	310	158	$1,12 \cdot 10^4$	1,11
2		343	343	236	$2,46 \cdot 10^4$	1,80
3		448	446	312	$4,36 \cdot 10^4$	2,26
4	С обработкой фронтальной поверхности ИЭП	345	340	223	$3,6 \cdot 10^4$	2,13
5		391	391	271	$4,68 \cdot 10^4$	2,18
6		454	457	130	$5,94 \cdot 10^4$	2,61

Анализ результатов, представленных в таблице 3, показывает, что динамическая прочность образцов с обработанной поверхностью выше, чем в случае образцов без модифицированной поверхности. Несмотря на то, что в эксперименте 3 значения откольной прочности выше, чем в эксперименте 5, однако, как будет показано в разделе 4, в эксперименте 3 уже произошло отделение откольной тарелочки от образца, в то время как в экспериментах 4 и 5 произошло только образование откольной щели.

С увеличением скорости деформации, как для образцов с модифицированной поверхностью, так и с немодифицированной, динамическая прочность стали 08X18H10T, как и в случае титанового сплава 3М, повышается. В отличие от сплава 3М на профилях скорости свободной поверхности отсутствуют зубцы и выступы.

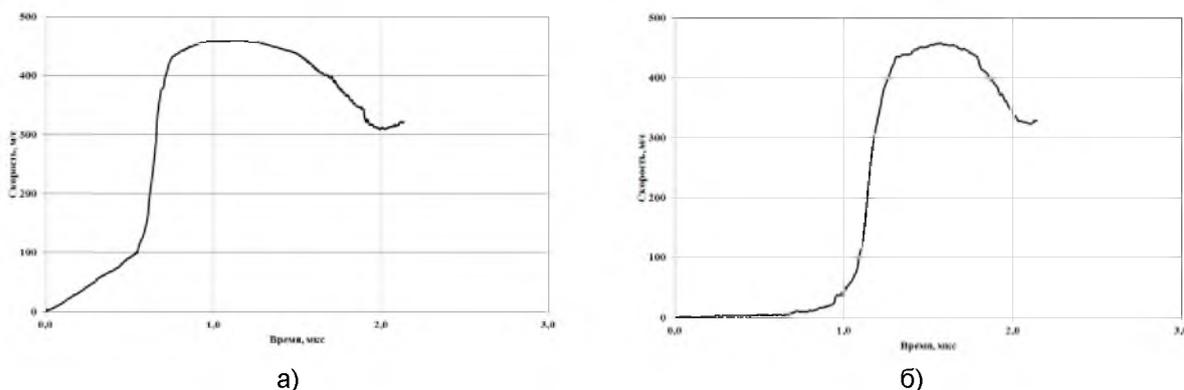


Рисунок 5 – Зависимость скорости свободной поверхности от времени в экспериментах 3 (а) и 6 (б) для образцов из стали 08X18H10T

**Бронза БрАЖНМц 9-4-1-1**

Результаты экспериментов по определению динамической прочности представлены в таблице 4, примеры профилей скорости свободной поверхности – на рисунке 6.

Таблица 4 – Результаты динамических испытаний бронзы марки БрАЖНМц 9-4-1-1

№	Обработка	$V_0$ , м/с	$W_1$ , м/с	$W_2$ , м/с	$\dot{\epsilon}$ , с-1	$\sigma_p$ , ГПа
1	Без обработки	394	393	231	$2,45 \cdot 10^4$	2,52
2		361	356	231	$2,49 \cdot 10^4$	1,94
3		188	188	72	$2,80 \cdot 10^4$	1,81
4		416	418	314	$3,31 \cdot 10^4$	1,62
5	С обработкой фронтальной поверхности ИЭП	331	329	190	$2,48 \cdot 10^4$	2,13
6		278	283	158	$3,73 \cdot 10^4$	1,95
7		420	424	275	$4,87 \cdot 10^4$	2,32

Результаты динамических испытаний образцов из бронзы марки БрАЖНМц 9-4-1-1 отличаются от аналогичных испытаний для образцов из титанового сплава 3М и стали 08Х18Н10Т. Так для образцов с немодифицированной поверхностью динамическая прочность уменьшается на 57% (с 2,52 ГПа до 1,62 ГПа) с увеличением скорости деформации на 35% (с  $2,45 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup> до  $3,31 \cdot 10^4$  с<sup>-1</sup>). Ранее для таких плосковолновых испытаний широкого круга металлов и сплавов такого снижения динамической (откольной) прочности с увеличением скорости деформации не наблюдалось. Как правило, наблюдался обратный эффект [8] и аналитическое выражение зависимости откольной прочности от скорости деформации имеет вид

$$\sigma_p = A \dot{\epsilon}^n$$

Рекомендуемые в [9] для некоторых металлов и сплавов значения  $n$  лежат в диапазоне  $n=0,059-0,21$ , а значения  $A=0,088-0,65$  ГПа.

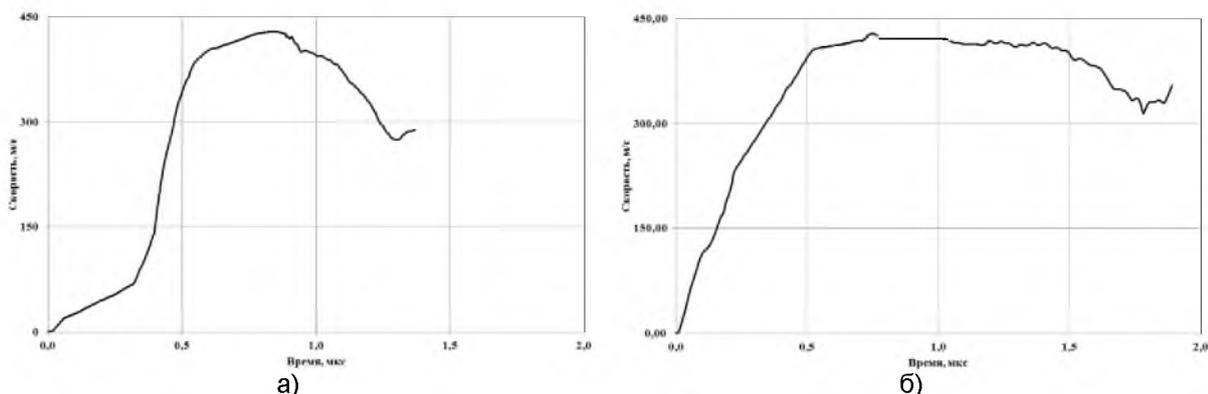


Рисунок 6 – Зависимость скорости свободной поверхности от времени в экспериментах 4 (а) и 7 (б) для образцов из бронзы БрАЖНМц 9-4-1-1

В то же время для образцов с модифицированной поверхностью значение динамической прочности в диапазоне изменения скорости деформации, представленном в таблице 4, практически остаётся постоянной величиной, что не противоречит ряду работ, например, [4,10] и другим. Необходимо отметить, что в указанных работах исследования проводились в более широком диапазоне скоростей деформации, чем в настоящей работе. Кроме того, свойства исследуемых материалов в указанных работах существенно отличались от свойств представляемых в настоящей главе вязких металлических сплавов.

#### 4. Структурные исследования

После динамических испытаний по определению динамической (откольной) прочности испытанные образцы разрезались вдоль диаметра и из них изготавливались металлографические шлифы. Исследования проводились как на нетравленных шлифах, так и на травленных.

Травление образцов из сплава 3М осуществлялось последовательным погружением в растворы плавиковой и азотной кислот. В пробах стали 08Х18Н10Т структура металла выявлялась методом электрохимического травления в 10% водном растворе щавелевой кислоты. Травление проб из бронзы БрАЖНМц 9-4-1-1 – осуществлялось с помощью раствора хлорного железа.

Для рассмотрения и фиксации структур, выявленных на шлифах проб мишеней, применялся световой микроскоп «Аксио Обсервер».

#### Титановый сплав 3М

Прежде всего, на протравленных образцах были произведены замеры микротвёрдости по всей высоте исследуемого образца. Для определения значений микротвёрдости использовался микротвердомер «Аффри», замеры микротвёрдости осуществлялись при нагрузке на индентор усилия 50 г. Такую микротвёрдость,

являющуюся следствием ударного нагружения, в дальнейшем будем называть наведённой микротвёрдостью. Для каждого образца было произведено не менее десяти замеров. Полученные результаты сведены в таблицу 5.

Таблица 5 – Микротвёрдость исследованных образцов

№ образца	Без обработки поверхности		С обработкой фронтальной поверхности ИЭП		
	1	2	3	4	5
HV, ГПа	$5,0 \pm 0,30$	$5,8 \pm 0,35$	$4,80 \pm 0,25$	$4,10 \pm 0,20$	$5,70 \pm 0,29$

Анализ результатов, приведенных в таблицах 5 и 2, показал:

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

Динамическая прочность образцов и максимальные растягивающие напряжения коррелируют со средней наведённой микротвёрдостью материала образцов: чем выше значения последней, тем выше значения  $\sigma_p$  (практически линейная зависимость). Таким образом, находит объяснение факт уменьшения максимальных растягивающих напряжений  $\sigma_p$  для образца 4.

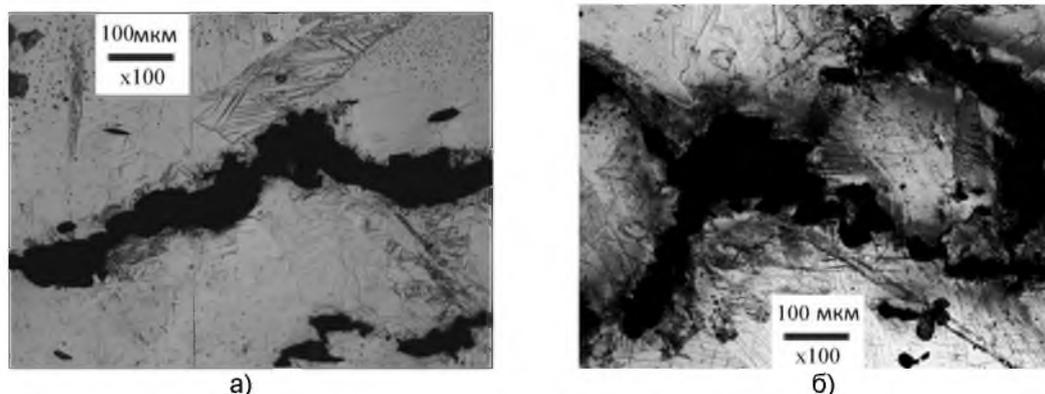


Рисунок 7 – Несплошности в образцах после удара со скоростью 495 м/с (а) и 500 м/с (б)

Структурные исследования 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 либо отдельных трещин мезо- макромасштабного уровня, либо скопления трещин (рис.7).

Для образцов с обработанной поверхностью таких нарушений сплошности образцов не наблюдалось. Однако у границы раздела упрочнённого слоя с подложкой наблюдался квазипериодический с шагом  $\sim 2$  мкм микрорельеф, сформированный из микротрещин указанного размера (рис.8).

Заметим, что исследования на мезо- и макромасштабном уровнях квазистатического деформирования образцов с поверхностным упрочнённым слоем показали [11], что в основе механизмов их пластического течения на мезоуровне лежит возникновение квазипериодических пространственно расположенных трещин в поверхностном упрочнённом слое и развитие в подложке полос локализованной деформации. С каждой поперечной трещиной в поверхностном слое связаны две мезополосы в подложке, чего не наблюдается в нашем случае. Кроме того, в нашем случае в упрочнённом слое вообще отсутствуют микротрещины.

В нашем случае квазипериодический рельеф из микротрещин на границе между упрочнённым слоем и подложкой, вероятно, является микрооткольной щелью между упрочнённым слоем и подложкой, что связано с различиями в их значениях акустической жёсткости ( $\rho_0 c_0$ ). Если акустические жёсткости различаются, то 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 упрочнённого слоя), сформировавшая в момент удара по фронтальной обработанной поверхности, пройдя упрочнённый слой, войдёт в подложку, и от границы раздела в обе стороны будет распространяться с отличным от  $p_0$  пиковым давлением и массовой скоростью отличной от  $V_0$ .

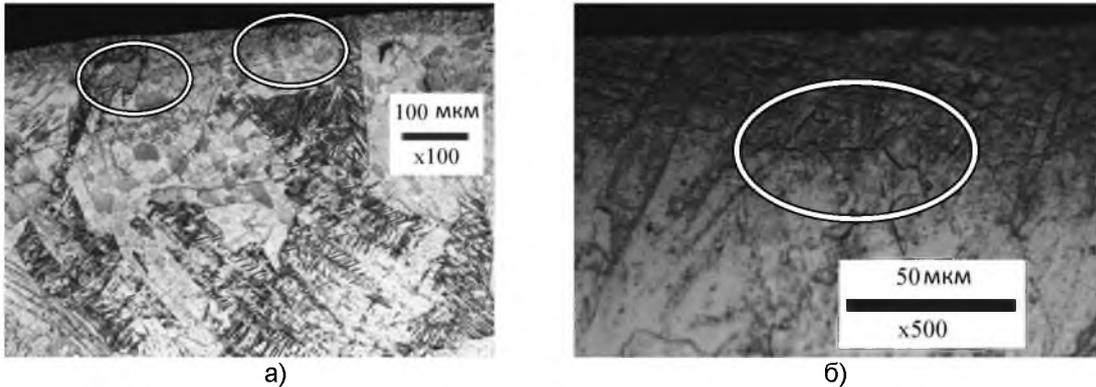


Рисунок 8 – Квазипериодический рельеф из микротрещин в образцах после удара со скоростью 438 м/с (а) и 484 м/с (б)

В конечном итоге интерференция волн разрежения от фронтальной поверхности вызовет некоторое подобие микротокола. В целом же, наличие упрочнённого слоя приводит к диссипации механической энергии первоначальной ударной волны, чем и объясняется отсутствие макротокольных процессов в толще образца.

#### Сталь 08X18H10T

Результаты измерения микротвёрдости образцов (аналогично образцам из титанового сплава 3М) приведены в таблице 6.

Полученные результаты по замерам микротвёрдости в совокупности с данными, приведенными в таблице 3, свидетельствуют о полной корреляции между микротвёрдостью и динамической прочностью как для образцов с немодифицированной поверхностью, так и с модифицированной с помощью ИЭП поверхностью: чем выше динамическая прочность, тем выше микротвёрдость образцов.

Таблица 6 – Микротвёрдость исследованных образцов

№ образца	Без обработки поверхности			С обработкой фронтальной поверхности ИЭП		
	1	2	3	4	5	6
HV, ГПа	3,5 ± 0,38	4,4 ± 0,5	4,9 ± 0,5	3,9 ± 0,4	4,40 ± 0,5	5,10 ± 0,5

Осмотр образцов при пятикратном увеличении показал, что для образцов с модифицированной поверхностью, с увеличением скорости удара от 345 м/с до 451 м/с ширина откольной щели увеличивается от 0,2 мм до 2 мм (рис.9,а–9,в), в то время как, для образцов с немодифицированной поверхностью при сопоставимой скорости удара 448 м/с образуется откольная тарелочка, которая полностью отделяется от образца (рис.9,г).

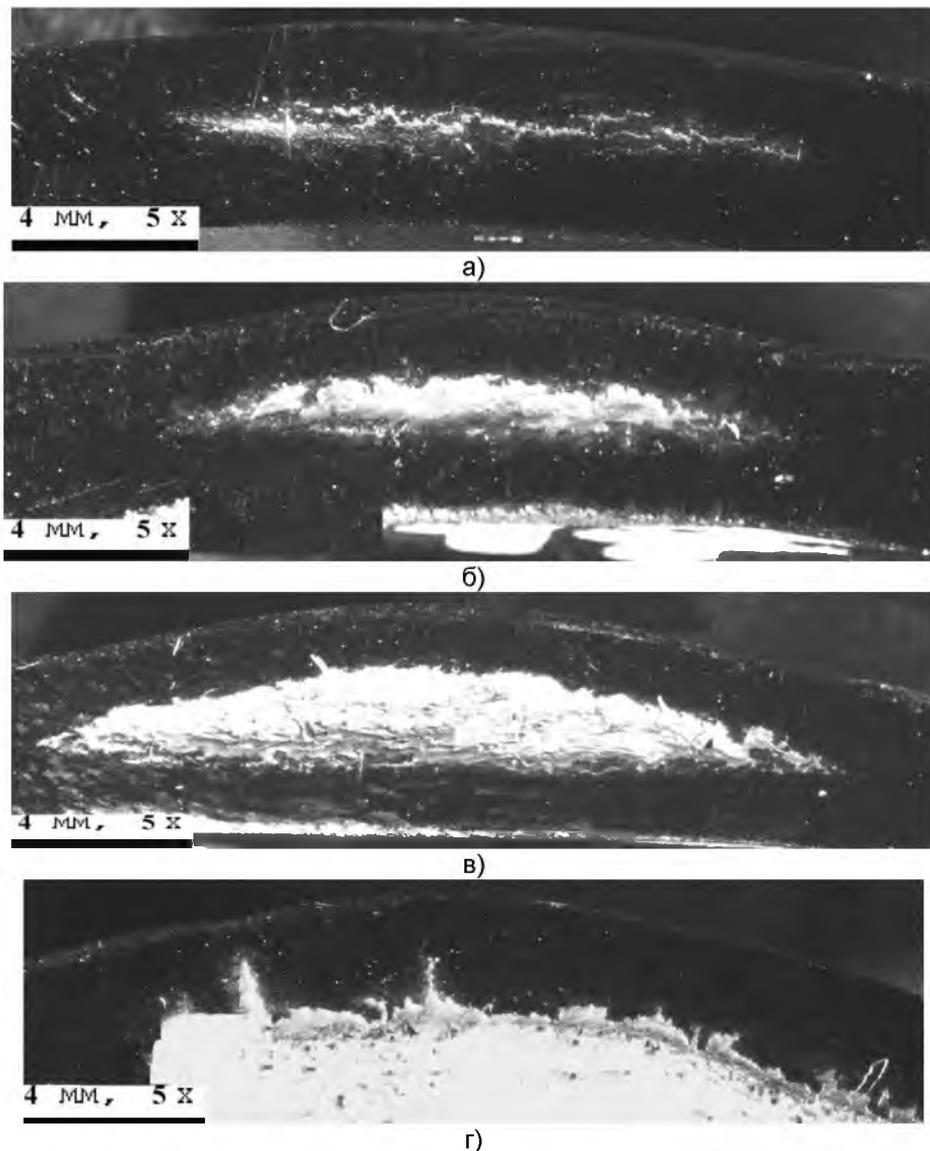


Рисунок 9 – Образование откольной щели в образцах с модифицированной поверхностью:  
 (а) –  $V_0=345$  м/с, (б) –  $V_0=391$  м/с, (в) –  $V_0=451$  м/с и образец без откольной тарелочки:  
 (г) –  $V_0=448$  м/с

Таким образом, уже на основании данного результата, можно сделать вывод о том, что образцы с модифицированной поверхностью обладают большей динамической прочностью к воздействию плоского удара по отношению к образцам с немодифицированной поверхностью.

Более подробные металлографические исследования образцов с модифицированной поверхностью выявили, что в морфологии откольного разрушения преобладает чередование актов сдвига и отрыва (рис. 10). Относительно направления удара микрообъемы локализованного сдвига в форме полос отклонены на угол  $\sim 45^\circ$ . Полосовая морфология участков сдвига свидетельствует о том, что они образовались на заключительных этапах повреждения материала мишени вследствие потери механической устойчивости. Ориентация микро- и мезотрещин отрыва относительно направления удара характерна для квазихрупкого разрушения металла после некоторой пластической деформации в «предельно» упрочненных мезообъемах. При этом рельеф мезотрещин воспроизводит очертания зеренного строения металла, что типично при квазихрупком разрушении.

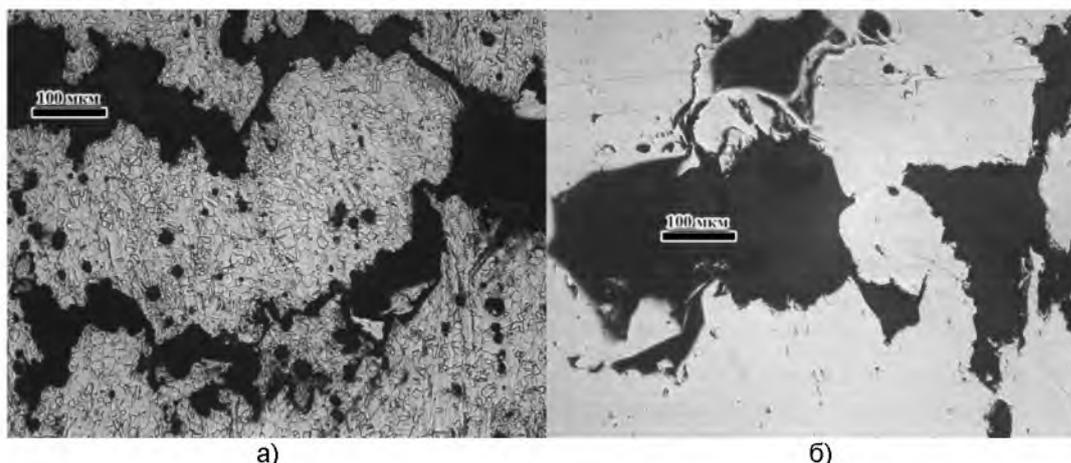


Рисунок 10 – Примеры несплошностей, выявленные в образцах с модифицированной поверхностью: (а) –  $V_0=345$  м/с, (б) –  $V_0=391$  м/с

В то же время в образцах с немодифицированной поверхностью микро-мезотрещины сдвига ориентированы, в основном, вдоль направления удара (рис.11,а), что указывает на квазивязкий тип динамического разрушения при движении волны сжатия и появления дисперсии скоростей частиц среды [12–14]. На заключительной стадии разрушения локализованные сдвиги также отклоняются на  $\sim 45^\circ$ , а при интерференции волн разгрузки и появлении растягивающих напряжений в металле образца возникают трещины отрыва (рис.11,б).



Рисунок 11 – Микро-мезотрещины сдвига (а) и профиль части поверхности откольного разрушения (б), зафиксированные на после удара со скоростью 448 м/с

Подробные исследования приповерхностного слоя образцов с модифицированной поверхностью выявили следующие особенности. При скорости удара  $V_0=345$  м/с слабый волнообразный рельеф упрочнённого слоя с длиной волны  $\sim 300$  мкм и амплитудой  $\sim 10$  мкм остался без изменения по отношению к исходному состоянию (см. рис.1,б), но на границе слоя с подложкой образовались микротрещины с квазипериодическим шагом  $\sim (10-15)$  мкм (рис.12,а), что можно трактовать как аналогичную в титановом сплаве 3М микрооткольную щель.

При скорости удара  $V_0=391$  м/с на поверхности мишени образовался волнообразный рельеф с той же длиной волны, но с амплитудой 50–70 мкм (рис.12,б). Можно предполагать, что такая амплитуда волнообразного рельефа вызвана ударным воздействием на образец. При этом, как видно из рисунка 12, после удара со скоростью  $V_0=391$  м/с микро- мезотрещины сдвига, направленные вдоль направления ударной волны, существенно превосходят по количеству и размерам аналогичные дефекты в образце после скорости  $V_0=345$  м/с, что указывает на их зависимость от амплитуды волны сжатия.



Рисунок 12 – Фрагменты образцов с участками фронтальной поверхности после ЭПО и удара со скоростью  $V_0=345$  м/с (а) и  $V_0=391$  м/с (б)

### Бронза БрАЖНМц 9-4-1-1

Результаты измерения микротвёрдости образцов (аналогично образцам из титанового сплава 3М и нержавеющей стали 08Х18Н10Т) приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Микротвёрдость исследованных образцов из БрАЖНМц 9-4-1-1

№	Без обработки поверхности				С обработкой фронтальной поверхности ИЭП		
	1	2	3	4	5	6	7
HV, ГПа	$4,0 \pm 0,6$	$4,2 \pm 0,7$	$3,4 \pm 0,4$	$4,7 \pm 0,7$	$4,3 \pm 0,4$	$4,9 \pm 0,5$	$5,1 \pm 0,7$

При анализе результатов, представленных в таблице 7, прежде всего, обращает на себя внимание существенно больший разброс в значениях микротвёрдости по отношению к образцам из титанового сплава 3М (табл.5) и больший разброс по отношению к образцам из стали 08Х18Н10Т. Можно предполагать, что больший разброс в значениях микротвёрдости связан, как уже говорилось выше, с полифазностью бронзы БрАЖНМц 9-4-1-1, в частности, с тем, что в ней может присутствовать пластичная  $\alpha$ -фаза (твёрдый раствор алюминия в меди).

Несмотря на разброс в результатах замеров микротвердости, функциональная зависимость

$$HV = F V_0$$

указывает на известный и многократно проверенный эффект роста сопротивления металла ударному воздействию с увеличением скорости соударения [15]. Данное утверждение и результат относятся также и к образцам титанового сплава 3М стали 08Х18Н10Т. Если значения микротвердости (HV) истолковать как оценку локальной «микропрочности» среды (слока), то в простейшем представлении из полученных данных следует линейная скоростная зависимость, характерная для «линейно-вязкой» среды в виде:

$$\sigma_{лок} = F V_0 = AV + B$$

где А и В – константы.

Приведенная линейная аппроксимация экспериментальных данных отличается от классической квадратичной скоростной зависимости сопротивления материалов [16,17]. Предполагается, что значения константы «А» характеризуют чувствительность материала к влиянию скорости на сопротивление деформированию.

Просмотр образцов с модифицированной поверхностью после их ударного нагружения при пятикратном увеличении выявил, что при скоростях удара  $V_0$  в диапазоне от 278 м/с до 420 м/с последовательно формируется откольная щель шириной от 0,1 мм до 2 мм и длиной от 2,5 мм до 20 мм (рис. 13,а–13,в).

Для образцов с немодифицированной поверхностью уже при скорости удара  $V_0=361$  м/с образуется откольная тарелочка, которая полностью отделяется от образца (рис.13,г). Таким образом, полученные результаты осмотра образцов при пятикратном увеличении свидетельствуют о том, что образцы с модифицированным поверхностным слоем обладают большей динамической прочностью, чем образцы с немодифицированной поверхностью.

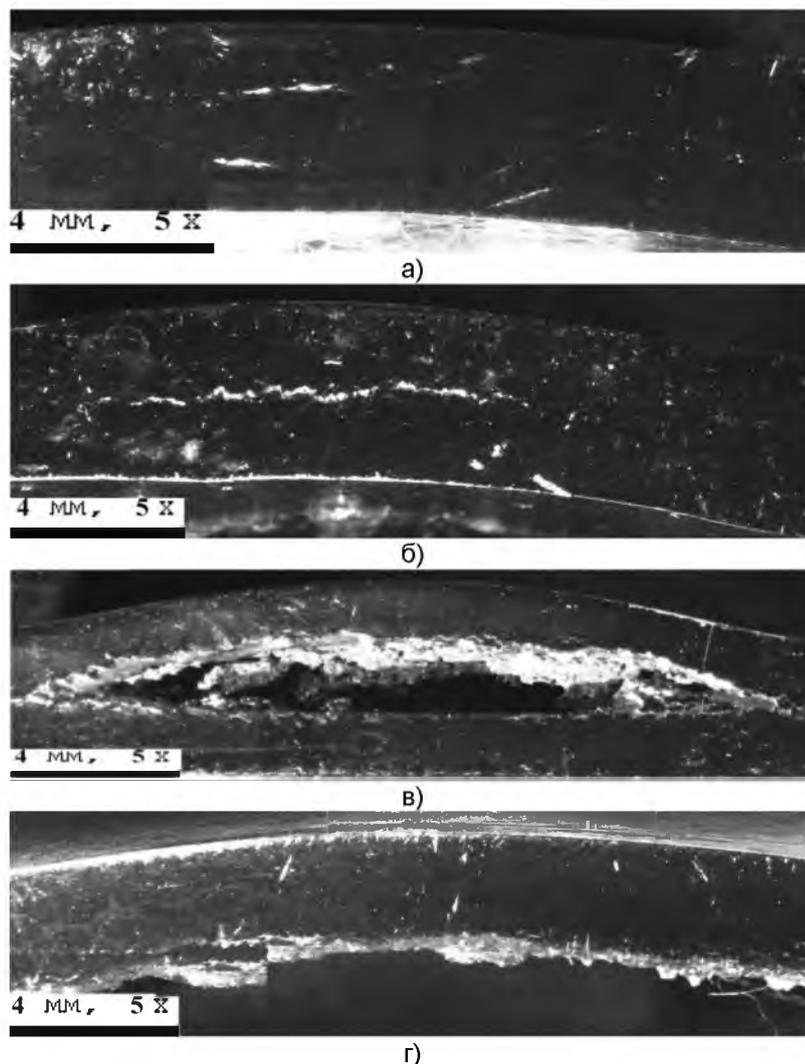


Рисунок 13 – Последовательность формирования откольной щели: (а) –  $V_0=278$  м/с, (б) –  $V_0=331$  м/с, (в) –  $V_0=420$  м/с, (г) сформированная откольная тарелочка –  $V_0=361$  м/с

Детальный металлографический анализ испытанных образцов с модифицированной поверхностью показал, что упрочнённый поверхностный слой (рис.14) не претерпел существенных изменений по отношению к исходному состоянию (рис.1,в). Равномерный по толщине ( $30\pm 10$  мкм) слой характеризовался измельченным до  $10\pm 5$  мкм строением неравноосных субзерен, наибольшая ось которых ориентирована по направлению нормали вглубь основного металла мишени. Тем не менее, можно отметить, что в результате удара на некоторых участках поверхностного слоя сформировался надслой с более измельчённой субзеренной структурой (показан стрелкой на рис.14), который, по всей видимости, образовался за счёт ударного воздействия.

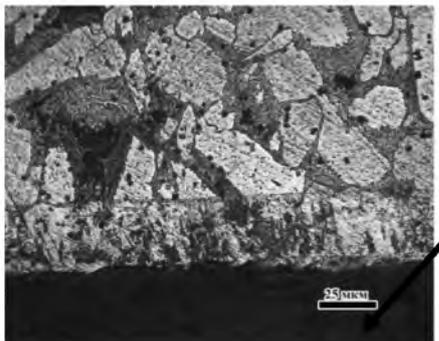


Рисунок 14 – Структура приповерхностного слоя в образце после удара со скоростью  $V_0=420$  м/с (стрелкой указан надслой, сформированный в процессе удара)

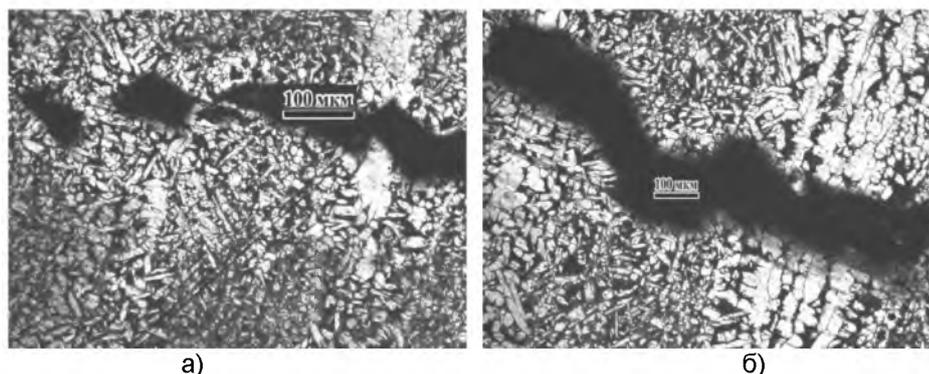


Рисунок 15 – Несплошности в зоне формирования откольной щели:  
(а) –  $V_0=278$  м/с, (б) –  $V_0=331$  м/с

Кроме того, детальный просмотр образцов с модифицированной поверхностью в зоне формирования откольной щели показал, что, в зависимости от скорости соударения, последовательность процессов деформации и образования несплошностей такая же, как в рассмотренной выше нержавеющей стали 08Х18Н10Т.

Так (рис.15), ударная нагрузка активирует пластическую деформацию в объемах пластичной  $\alpha$ -фазы, результатом которой становится образование дислокационных зарядов на границах с эвтектоидом или упрочненными выделениями  $\gamma$ -фазы. Релаксация упругих полей деформационного происхождения, сосредоточенных преимущественно в стыках зерен, реализуется зернограницной деформацией и зернограницным отрывом. Последовательное чередование образующихся несплошностей говорит о том, что в деформируемой среде релаксационные явления происходят самоорганизованно по мере достижения критических условий в локальных объемах, минимальный размер которых соизмерим с величиной зерна  $\alpha$ -фазы.

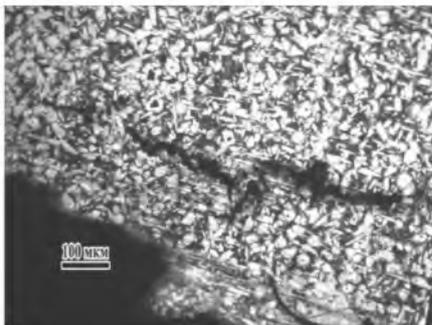


Рисунок 16 – Дефекты на откольной тарелочке ( $V_0=361$  м/с) (стрелкой показано формирование второй откольной щели)

Виды контуров локальных повреждений на разных участках шлифов и профили изломов, зарегистрированные на шлифах тарелочек откола образцов без модифицированного слоя (рис.16), не противоречат приведенной трактовке металлографических изображений структур (рис. 15).

### Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что электронно-пучковая обработка поверхности вязких металлических сплавов является эффективным методом повышения их динамической (откольной) прочности.

Кратковременное динамическое воздействие ударного типа на мишени, изготовленные из титанового сплава ЗМ, нержавеющей стали 08Х18Н10Т и бронзы марки БрАЖНМц 9-4-1-1, вызывает сопротивление деформируемого материала пропорционально скорости соударения. На величину сопротивления оказывают влияние, через масштабный фактор объектов, упрочнённый импульсным электронным пучком поверхностный слой и внутреннее строение, которые оказывают сопротивление движению носителей пластической моды – дислокациям.

Установлено, что для пластичных металлических сплавов с кристаллической решеткой в ГЦК и ГПУ модификациях при сопоставимых по величине параметрах зеренного строения и микротвердости в диапазоне 300–500 кгс/мм<sup>2</sup>, ударное нагружение со скоростями в интервале 100–500 м/с вызывает единообразную по физической природе ответную реакцию.

При воздействии плоских волн нагрузки в адекватном ответе нагружаемого тела доминантным механизмом является пластическая деформация на мезо- и макроскопическом структурных уровнях, которая, по мере исчерпания запаса пластичности материала, приводит к нарушению сплошности деформируемой среды путем чередования сдвигов, образующихся в прямой волне нагружения, и отрывов в волне растяжения, образующейся при интерференции волн разряжения. В конечном итоге, нарушение сплошности завершается разрушением мишени путём формирования откольной щели или откольной тарелочки.

### Список литературы:

1. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Круглый стол, 2001. – 528 с.
2. Иванов Ю.Ф., И.Б. Целлермаер И.Б., В.Е. Громов Закономерности эволюции структуры стали 65Г при электронно-пучковой обработке В.Е. Громов // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 2. – С. 21 – 27.
3. Овчаренко В.Е., Боянгин Е.Н. Влияние модифицирования импульсной электронно-пучковой обработки и пластичность интерметаллического соединения Ni3Al // Деформация и разрушение материалов. – 2013. – № 12. – С. 9 – 13.
4. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под общей ред. А.Г. Иванова. – Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2001. – 482 с.
5. Судьенков Ю.В. Особенности ударноволнового процесса в твёрдых телах вблизи поверхности высокоскоростного нагружения // Проблемы динамических процессов в гетерогенных средах. – Калинин: Изд-во Калининского государственного университета, 1987. – С. 120 – 126.
6. Криштал М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть I. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7, № 5. – С. 5 – 29.
7. 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 государственного университета, 1987. – С. 127 – 132.
8. Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. Осцилляции фронта пластической волны в условиях высокоскоростного нагружения // ПМТФ. – 2001. – Т.42, № 6. – С.117 – 123.
9. Antoun T., Seaman L., Curran D.R., et al. Spall Fracture. – N.-Y.: Springer, 2003. – 415 p.
10. Johnson J., Gray III G., Bourne N. Effect of Pulse Duration and Strain Rate on Spall Fracture in Copper // J. Appl. Phys. – 1999. – V. 86, № 9. – P. 4892 – 4901.

11. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Отв. Ред. В.Е. Панин. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
12. Мещеряков Ю.И., Диваков А.К. Интерференционный метод регистрации скоростной неоднородности частиц в упруго-пластических волны нагрузки в твёрдых телах. Препринт № 25. – Л.: ЛФИМаш им. А.А. Благодирова. – 36 с.
13. Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. Трещиностойкость материалов в условиях динамического нагружения // Прикладная механика и техническая физика. – 1993. – № 3. – С. 138 – 142.
14. Барахтин Б.К., Мещеряков Ю.И., Савенков Г.Г. Статистические характеристики множественного разрушения металлических мишеней при динамическом нагружении и их связь с механическими параметрами материалов // ЖТФ. – 2010. - Т. 80, вып.1. – С. 79 – 84.
15. Савенков Г.Г., Барахтин Б.К., Мурахин А.Н., Иовлева И.Н. Оценка сопротивления преград высокоскоростному внедрению клиновидного ударника // Проблемы прочности. – 1992. – № 7. – С. 48 – 51.
16. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Часть I. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
17. Высокоскоростное взаимодействие тел / Отв. Ред. В.М. Фомин.- Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 600 с.