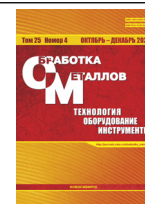




# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Влияние высокоэнергетического воздействия при плазменной резке на структуру и свойства поверхностных слоёв алюминиевых и титановых сплавов

Валерий Рубцов<sup>1, a, \*</sup>, Александр Панфилов<sup>1, b</sup>, Евгений Княжев<sup>1, c</sup>, Александра Николаева<sup>1, d</sup>,  
Андрей Черемнов<sup>1, e</sup>, Анастасия Гусарова<sup>1, f</sup>, Владимир Белобородов<sup>1, g</sup>, Андрей Чумаевский<sup>1, h</sup>,  
Артём Гриненко<sup>2, i</sup>, Евгений Колубаев<sup>1, k</sup>

<sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия

<sup>2</sup> ООО «ИТС-Сибирь», г. Красноярск, Северное шоссе, 16а, 660118, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, [rvy@ispms.tsc.ru](mailto:rvy@ispms.tsc.ru); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>, [alexpl@ispms.ru](mailto:alexpl@ispms.ru);  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>, [clothoid@ispms.tsc.ru](mailto:clothoid@ispms.tsc.ru); <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8708-8540>, [nikolaeva@ispms.tsc.ru](mailto:nikolaeva@ispms.tsc.ru);  
<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2225-8232>, [amc@ispms.tsc.ru](mailto:amc@ispms.tsc.ru); <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4208-7584>, [gusarova@ispms.ru](mailto:gusarova@ispms.ru);  
<sup>g</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, [vabel@ispms.tsc.ru](mailto:vabel@ispms.tsc.ru); <sup>h</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, [tch7av@gmail.com](mailto:tch7av@gmail.com);  
<sup>i</sup> <https://orcid.org/0009-0002-9511-1303>, [giga2011@yandex.ru](mailto:giga2011@yandex.ru); <sup>k</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, [eak@ispms.tsc.ru](mailto:eak@ispms.tsc.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14

#### История статьи:

Поступила: 26 сентября 2023  
Рецензирование: 11 октября 2023  
Принята к печати: 18 октября 2023  
Доступно онлайн: 15 декабря 2023

#### Ключевые слова:

Плазменная резка  
Титановый сплав BT1-0  
Макроструктура  
Алюминиевый сплав Д16АТ  
Алюминиевый сплав АМг5  
Зона термического влияния  
Изменение механических свойств материала

#### Финансирование

Результаты получены при выполнении комплексного проекта «Создание производства высокотехнологичного оборудования адаптивной высокоточной плазменной резки цветных металлов больших толщин для металлургической, авиакосмической и транспортной отраслей РФ» (соглашение о предоставлении субсидии от 06.04.2022 № 075-11-2022-012), реализуемого ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

#### Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Плазменная резка различных металлов и сплавов является одним из наиболее производительных процессов получения заготовок, особенно при использовании плазматронов с обратной полярностью. Применение плазменной резки при получении заготовок больших толщин потенциально позволяет повысить производительность получения заготовок. В отечественной промышленности широко применяется оборудование для плазменной резки зарубежного производства, что ставит задачи по импортозамещению выпускаемых деталей и устройств соответствующими изделиями российских предприятий. По этой причине в настоящее время в Институте физики прочности и материаловедения совместно с предприятием «ИТС-Сибирь» ведется разработка оборудования плазменной резки на токах обратной полярности. При этом для установления особенностей влияния параметров и режимов процесса плазменной резки на структуру металла в зоне реза необходимо проведение сравнительных исследований на различных металлах и сплавах. **Цель работы:** выявление особенностей влияния высокоэнергетического воздействия на структуру и свойства поверхностных слоёв алюминиевых и титановых сплавов при плазменной резке с использованием плазматрона, работающего на токах обратной полярности. **Методами исследования** являются оптическая металлография, измерение микротвердости и лазерная сканирующая микроскопия поверхности после плазменной резки. **Результаты и обсуждение.** Проведенные исследования показывают широкие возможности регулирования параметров процесса плазменной резки алюминиевых сплавов АМг5 и Д16АТ и титанового сплава BT1-0. Для использованных в работе сплавов имеются оптимальные значения параметров процесса, отклонения от которых приводят к различным нарушениям качества реза. Сплавы алюминия демонстрируют склонность к существенному разупрочнению в зоне резки, что связано с формированием крупнокристаллической структуры и больших некогерентных выделений вторичных фаз с одновременным обеднением твердого раствора легирующими элементами. Для титановых сплавов характерно проявление закалочных эффектов в зоне реза с повышением значений микротвердости. В поверхностных слоях, несмотря на применение азота в качестве защитного газа, также формируются окислы. Причем в ранее проведенной работе в сплаве ОТ4-1 не отмечается формирования оксидных пленок с высокой твердостью, в то время как в сплаве BT1-0 при резке в поверхностных слоях формируются окислы, резко повышающие значения микротвердости материала вплоть до величин порядка 15 ГПа. Такое положение может затруднять механическую обработку титановых сплавов после плазменной резки. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно невысокой величине припуска на дальнейшую механическую обработку после плазменной резки алюминиевых и титановых сплавов.

**Для цитирования:** Влияние высокоэнергетического воздействия при плазменной резке на структуру и свойства поверхностных слоёв алюминиевых и титановых сплавов / В.Е. Рубцов, А.О. Панфилов, Е.О. Княжев, А.В. Николаева, А.М. Черемнов, А.В. Гусарова, В.А. Белобородов, А.В. Чумаевский, А.В. Гриненко, Е.А. Колубаев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 216–231. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-216-231.

#### \*Адрес для переписки

Рубцов Валерий Евгеньевич, ведущий научный сотрудник  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
пр. Академический, 2/4,  
634055, г. Томск, Россия  
Тел.: +7 (382) 228-68-63, e-mail: [rvy@ispms.ru](mailto:rvy@ispms.ru)

## Введение

Технологии, основанные на применении плазменного воздействия на материал, широко применяются для обработки изделий [1], модификации поверхности и формирования покрытий [2], напыления [3], в также во многих других областях промышленного производства изделий из металлов, сплавов, керамик, полимеров и др. Высокая плотность энергии плазменной струи позволяет как применять её для материалов с высокой температурой плавления, так и повышать производительность связанных с ней процессов. В частности, высокая мощность плазменной струи позволяет использовать её при получении заготовок для последующего промышленного производства.

В современном промышленном производстве плазменная резка наряду с лазерной или гидроабразивной является одним из наиболее часто применяемых методов получения заготовок из металлов и сплавов [4]. Плазменная резка обладает преимуществом в виде высокой производительности и возможности резки листового проката больших толщин [5]. Однако, несмотря на широкую распространенность плазменных технологий, в настоящее время ещё имеется ряд аспектов, требующих дополнительных исследований. К ним относится уменьшение шероховатости поверхности реза [6–8], снижение влияния процесса резки на структуру материала [9–11], а также повышение производительности и точности процесса резки. В отечественной промышленности дополнительной задачей является получение аналогов используемого в настоящее время зарубежного оборудования.

Достижение качества реза возможно за счет оптимизации параметров процесса резки [12–14], основными из которых являются ток и напряжение горения дуги [15–17]. Значительное влияние на процесс резки и качество поверхности реза оказывает и толщина используемого листового проката [18]. Плазменная резка толстолистового проката с использованием плазмотронов прямой полярности потенциально затруднена в связи с износом катодных вставок или температурным режимом работы [19, 20], что особенно важно при растущей потребности в импортозамещении комплектующих. Плазменная резка листового проката на токах обратной полярно-

сти имеет большую актуальность и потенциально позволяет получать более качественную поверхность реза. В связи с вышеперечисленным в настоящее время совместно «ИТС-Сибирь» и ИФПМ СО РАН производится разработка современного оборудования для плазменной резки на токах обратной полярности. В данном случае важным является установление влияния энергетического воздействия при плазменной резке, обусловленного параметрами процесса, на морфологию, структуру и механические свойства поверхностных слоёв заготовок. Такие исследования применительно к листовому прокату алюминиевых и титановых сплавов являются **целью** настоящей работы.

## Методика исследований

Экспериментальные исследования выполнялись на производственном участке в ООО «ИТС-Сибирь» и на экспериментальном оборудовании в ИФПМ СО РАН. Схема процесса плазменной резки приведена на рис. 1, *а*. Внешний вид установки плазменной резки представлен на рис. 1, *б*. Установка состоит из рабочего стола, плазмотрона, блока газоподготовки, перемещающегося суппорта и направляющих. В эксперименте использовался плазмотрон с обратной полярностью. Резка алюминиевых сплавов производилась с применением плазмообразующего газа в виде воздуха. В качестве защитного и плазмообразующего газа при резке титанового сплава использовали азот.

Резка образцов 1 производилась плазменной струей 2, формируемой за счет горения дуги между водоохлаждаемым электродом 3 и внутренним корпусом плазмотрона, в котором постоянно пропускаться поток плазмообразующего газа 4. Для резки титанового сплава применялся защитный газ азот 5, подаваемый во внешнем контуре плазмотрона. Расплавленный металл 6 выдувался из зоны реза потоком газа. В результате резки на поверхности образцов формировалась область термически деградировавшего материала (или зона термического влияния) 7 и слой оплавленного металла (или зона плавления) 8.

В качестве экспериментального материала использовался листовый прокат алюминиевых сплавов Д16АТ, АМг5 и титанового сплава

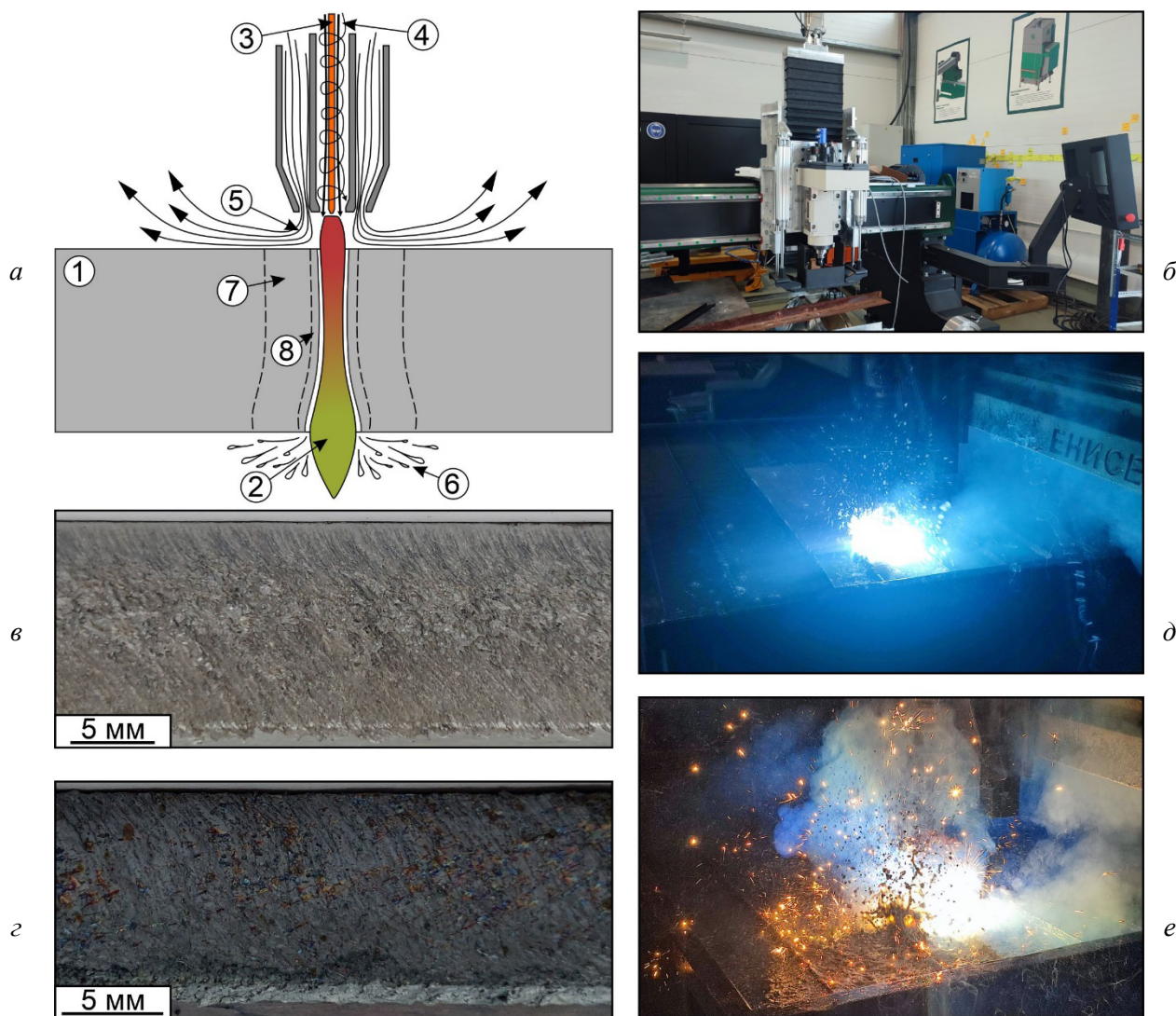


Рис. 1. Плазменная резка экспериментальных образцов:

*a* – схема процесса резки; *б* – внешний вид разрабатываемого оборудования для плазменной резки; *в* – внешний вид поверхности реза алюминиевого сплава Д16АТ; *г* – внешний вид поверхности реза титанового сплава ВТ1-0; *д* – снимок процесса резки алюминиевого сплава Д16АТ; *е* – снимок процесса резки титанового сплава ВТ1-0; 1 – заготовка; 2 – плазменная струя; 3 – водоохлаждаемый электрод; 4 – плазмообразующий газ; 5 – защитный газ; 6 – вытесняемый материал из зоны реза; 7 – зона термического влияния; 8 – зона оплавления поверхности

Fig. 1. Plasma cutting of experimental specimens:

plasma cutting flow diagram (*a*); general view of developed setup for plasma cutting (*b*); general view of the cut surface of aluminum alloy AA2124 (*в*); general view of the cut surface of Grade2 titanium alloy (*г*); image of the cutting process of aluminum alloy AA2024 (*д*); image of the cutting process of Grade2 titanium alloy (*е*); 1 – blank; 2 – plasma jet; 3 – water-cooled electrode; 4 – plasma-supporting gas; 5 – shielding gas; 6 – material displaced from the cutting zone; 7 – heat affected zone; 8 – surface melting zone

ВТ1-0 толщиной 10 мм. Параметры процесса резки регулировались для достижения различной погонной энергии процесса. Основными параметрами резки являлись ток и напряжение горения дуги, составлявшие 170 А и 125 В соответственно. В качестве регулируемого параметра в основном выступала скорость резки (см. таблицу).

После получения экспериментальных образцов из них электроэрозионным методом (станок

DK7750) производилась вырезка металлографических шлифов для структурных исследований и выявления особенностей изменения механических свойств приповерхностной зоны. Структурные исследования производились на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ 1С» и лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT 4100. Микротвердость определяли от поверхности реза вглубь образца на металлографических шлифах на приборе Duramin-500.



## Режимы плазменной резки листового проката

## Plasma cutting modes for sheet meta

Сплав / Alloy	S, мм / S, mm	№ режима / Mode No.	I, A / I, A	U, В / U, V	V, м/мин / V, m/min	E, кДж/м / E, kJ/m
АМг5	10	1	170	125	3,4	6,3
АМг5	10	2	170	125	3,0	7,1
АМг5	10	3	170	125	2,7	7,9
АМг5	10	4	170	125	3,7	5,7
АМг5	10	5	170	125	4,1	5,2
Д16Т	10	1	170	125	4,2	5,1
Д16Т	10	2	170	125	3,8	5,6
Д16Т	10	3	170	125	3,3	6,4
Д16Т	10	4	170	125	4,6	4,6
Д16Т	10	5	170	125	5,0	4,3
ВТ1-0	10	1	170	125	4,1	5,2
ВТ1-0	10	2	170	125	3,4	6,3
ВТ1-0	10	3	170	125	3,0	7,1
ВТ1-0	10	4	170	125	2,7	7,9
ВТ1-0	10	5	170	125	2,4	8,9

## Результаты и их обсуждение

Плазменная резка образцов алюминиевых и титановых сплавов приводит к формированию на поверхности специфического рельефа, оконтуривающего течение расплавленного металла, который вытесняется потоком газа из полости реза [18]. В условиях резки образцов сплава АМг5 толщиной 10 мм такое положение приводило к формированию в нижней части реза характерного рельефа (рис. 2, в, е). Расстояние между выступами над поверхностью реза составляло около 200 мкм, величина выступов – до 180–200 мкм. В центральной и верхней частях области реза рельеф был более хаотичен и характеризовался большим размером неровностей. Величина выступов над поверхностью достигала более 450–500 мкм. Значимых отличий в строении поверхности реза на различных режимах не выявлено, для большинства образцов продемонстрированные на рис. 2 особенности строения поверхности реза сохраняются.

При резке образцов сплава Д16АТ по использованным режимам на поверхности не наблюдалось образования регулярного рельефа (рис. 3). Строение поверхности реза в верхней, центральной и нижней частях реза являлось достаточно близким. Величина выступов над поверхностью реза составляла до 400–450 мкм. Такая структу-

ра также характерна для большинства режимов и от одного образца к другому изменяется несущественно.

При резке образцов сплава ВТ1-0 происходило формирование более плавного рельефа на поверхности реза (рис. 4). Величина неровностей над поверхностью реза составляла в среднем до 200 мкм. Отличия в морфологии поверхности реза в верхней, нижней и средней частях реза хотя и имеются, но связаны больше с ориентацией элементов рельефа, чем с величиной неровностей.

Структура образцов сплава АМг5 (рис. 5) в поверхностных слоях после резки представлена в основном зоной оплавленного металла (ЗП) и зоной термического влияния (ЗТВ), постепенно переходящей в зону основного металла (ОМ). Величина макроискажений поверхности реза изменяется в зависимости от режима. Наименьшее искажение (до 1000–1200 мкм) характерно для образцов, полученных в режиме № 2 при относительно невысокой (3,0 м/мин) скорости резки и выше среднего (7,1 кДж/м) энергозатрат при резке (рис. 5, а–д). Повышение скорости резки от указанных значений приводит к значительному снижению качества реза, а снижение скорости резки не приводит к повышению точности реза. Величина зоны плавления находится на достаточно низком уровне и не превышает 150 мкм от поверхности реза (рис. 5, ж, з).



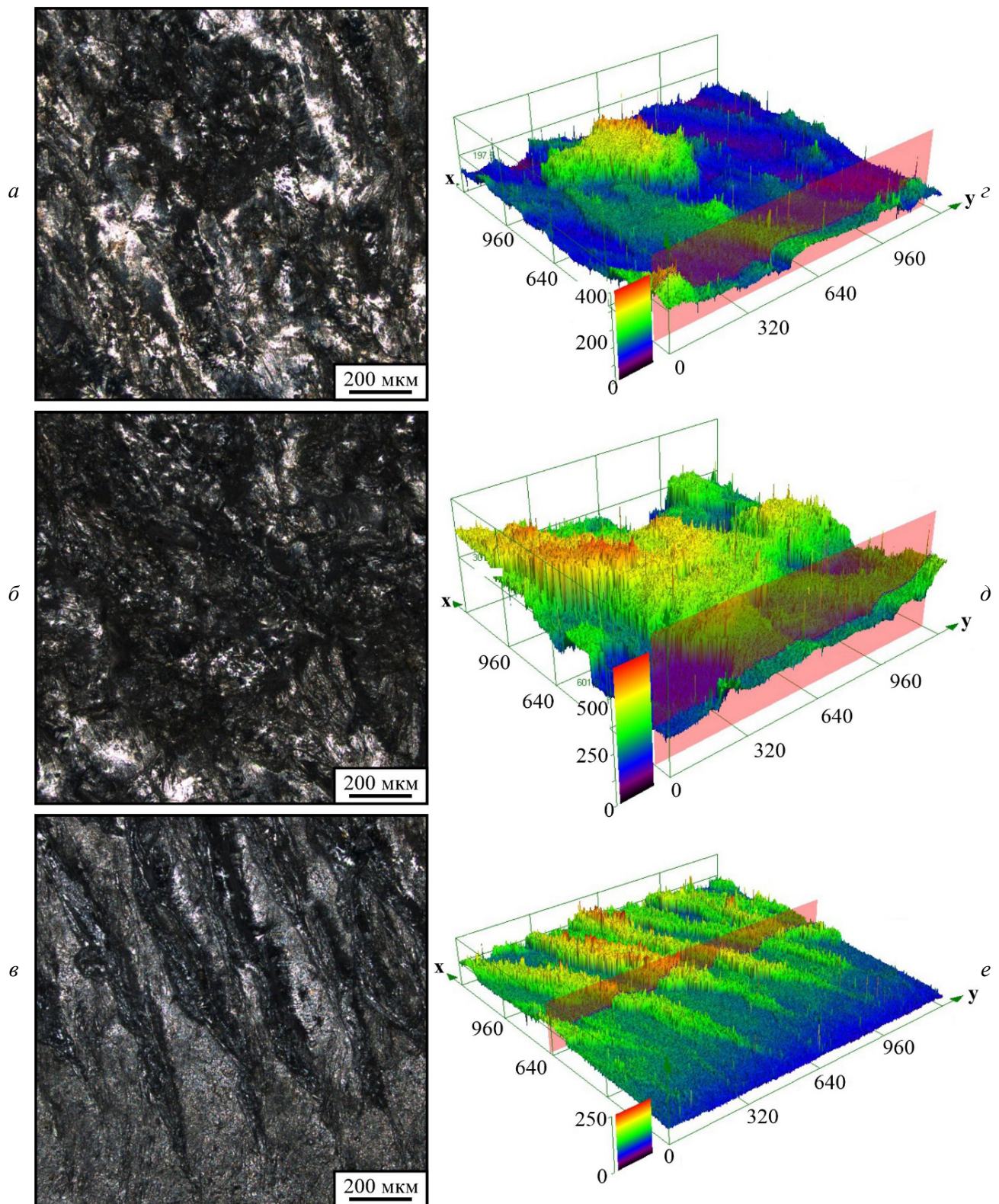


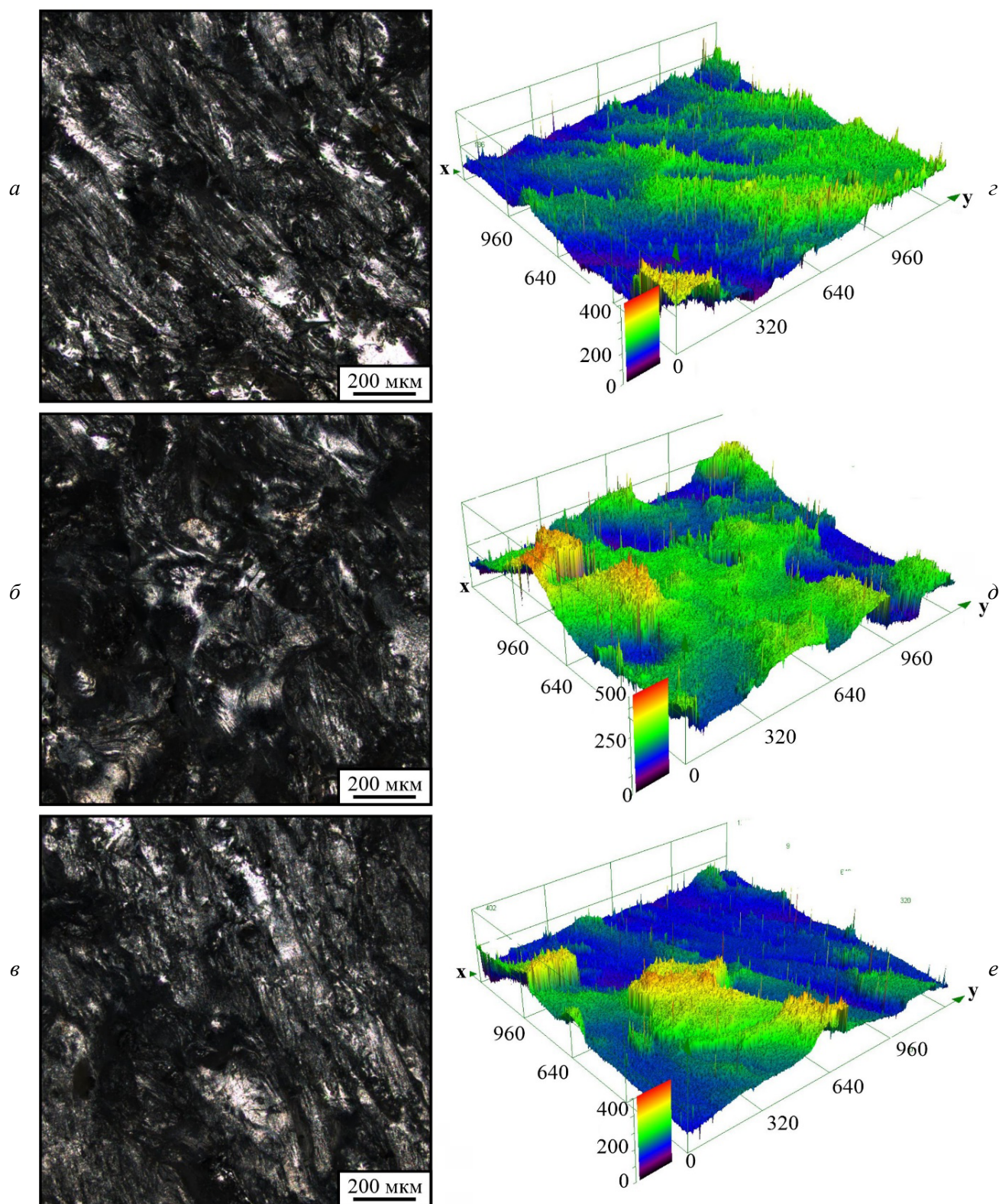
Рис. 2. Морфология поверхности образца сплава АМг5 после резки:

$a, б$  – верхняя часть реза,  $в, z$  – центральная часть реза;  $д, e$  – нижняя часть реза;  $a, б, в$  – оптические снимки поверхности;  $z, д, e$  – 3D-изображения, полученные на конфокальном микроскопе

Fig. 2. Surface morphology of AA5056 alloy specimen after cutting:

the upper part of the cut ( $a, б$ ); the central part of the cut ( $в, z$ ); the lower part of the cut ( $д, e$ ); optical images of the surface ( $a, б, в$ ); 3D images obtained by confocal microscope ( $z, д, e$ )





*Рис. 3.* Морфология поверхности образца сплава Д16АТ после резки:  
 $a, b$  – верхняя часть реза;  $z$  – центральная часть реза;  $d, e$  – нижняя часть реза;  $a, b, v$  – оптические снимки поверхности;  $z, d, e$  – 3D-изображения, полученные на конфокальном микроскопе

*Fig. 3.* Surface morphology of AA2024 alloy specimen after cutting:  
 the upper part of the cut ( $a, b$ ); the central part of the cut ( $z$ ); the lower part of the cut ( $d, e$ ); optical images of the surface ( $a, b, v$ ); 3D images obtained by confocal microscope ( $z, d, e$ )



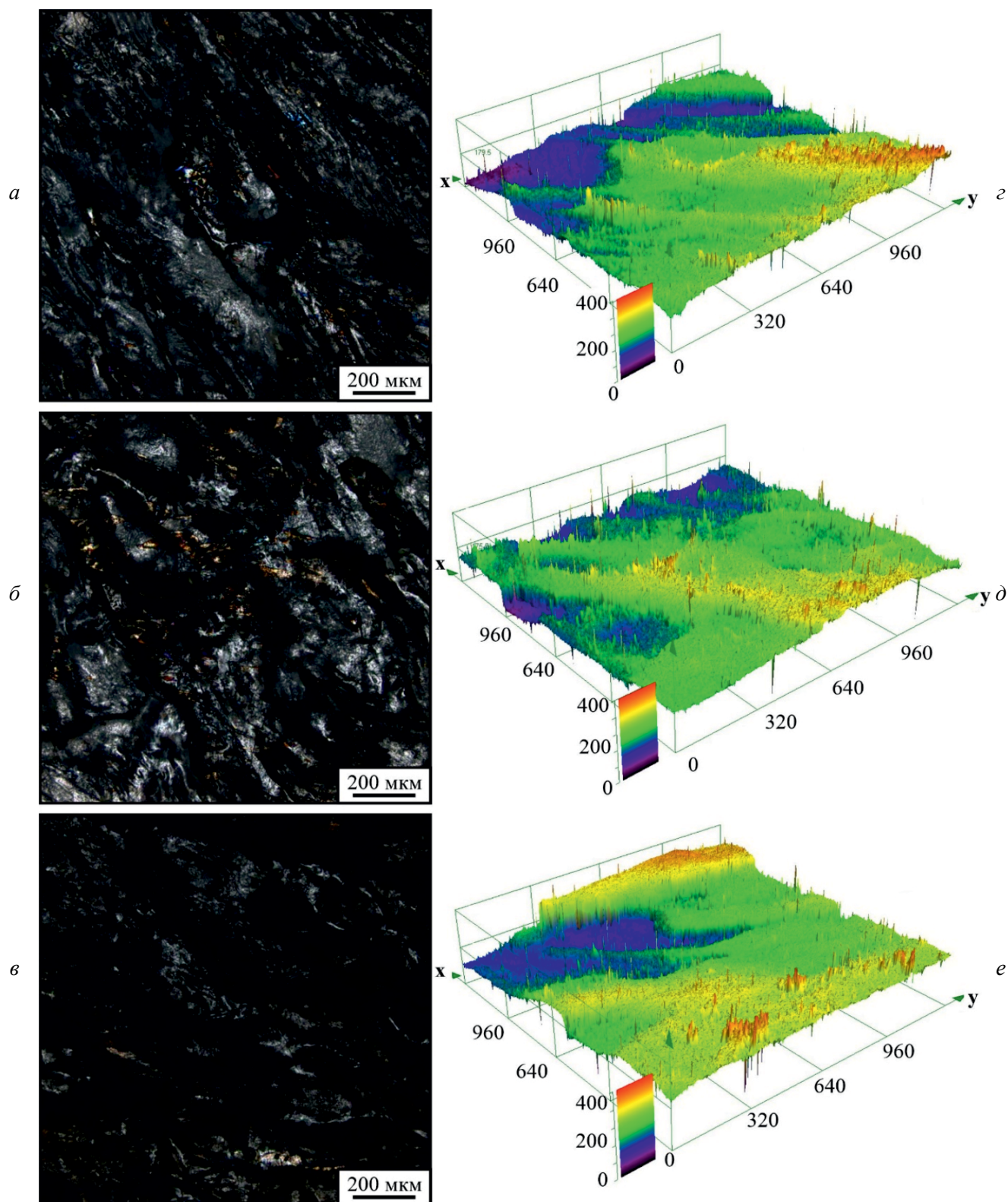


Рис. 4. Морфология поверхности образца сплава ВТ1-0 после резки:

$a, б$  – верхняя часть реза;  $в, z$  – центральная часть реза;  $д, e$  – нижняя часть реза;  $a, б, в$  – оптические снимки поверхности;  $z, д, e$  – 3D-изображения, полученные на конфокальном микроскопе

Fig. 4. Surface morphology of Grade2 titanium alloy specimen after cutting:

the upper part of the cut ( $a, б$ ); the central part of the cut ( $в, z$ ); the lower part of the cut ( $д, e$ ); optical images of the surface ( $a, б, в$ ); 3D images obtained by confocal microscope ( $z, д, e$ )



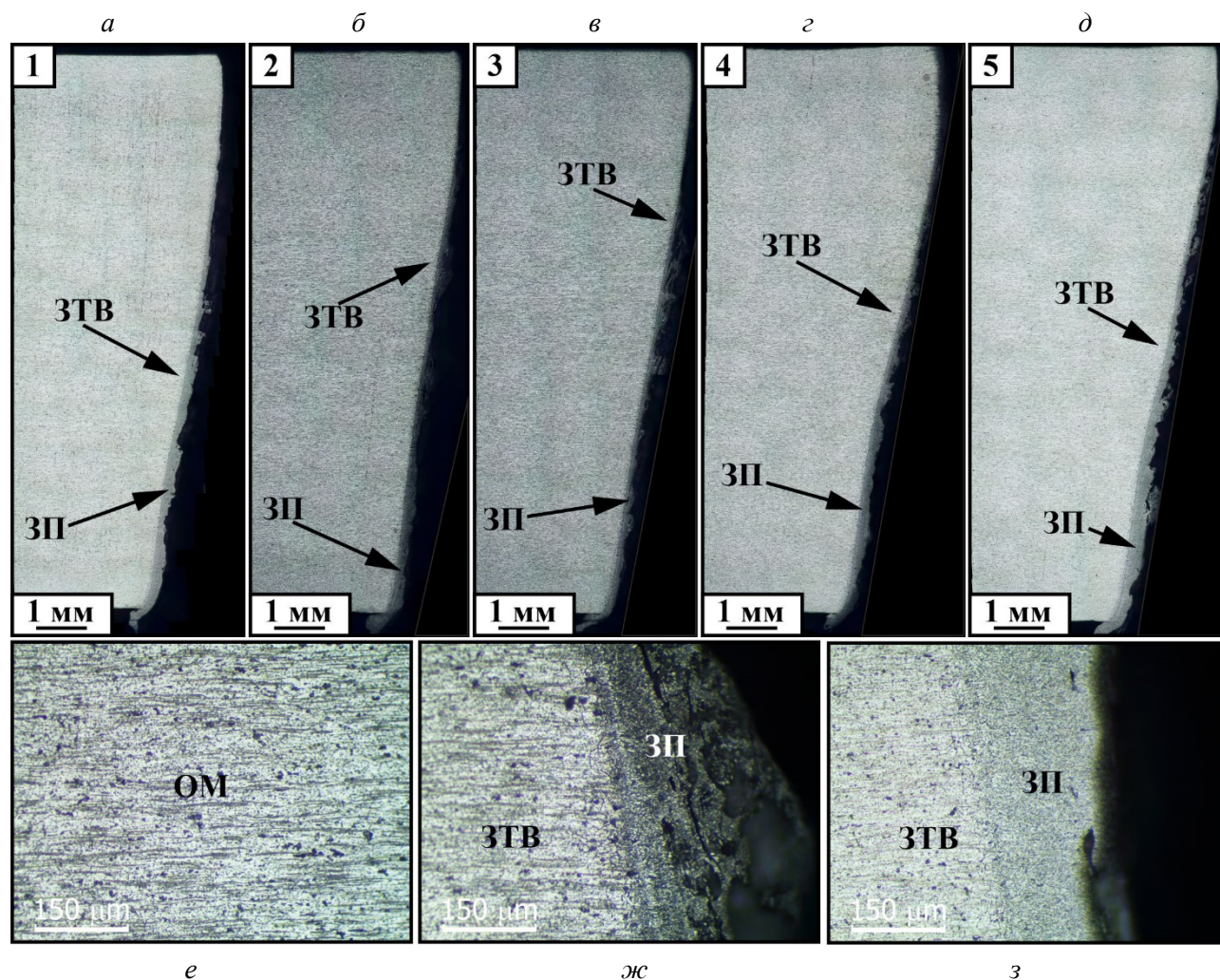


Рис. 5. Структура в зоне резки сплава АМг5:

*a–d* – макроструктура реза; *e* – исходная структура материала ОМ; *ж, з* – зоны плавления ЗП и термического влияния ЗТВ

Fig. 5. The structure in the cutting zone of the AA5056 alloy:

the macrostructure of the cut (*a–d*); the initial structure of the base material (*e*); the fusion zones and the heat affected zone (*ж, з*)

Структура в этой области представлена типичным для литого металла дендритным строением, формируемым при кристаллизации из расплава. Размер зоны термического влияния на поверхности металлографических шлифов не выявляется, структура в ней практически идентична основному металлу (рис. 5, *e–з*). Это связано с достаточно высокой стойкостью термически неупрочняемого деформируемого алюминиевого сплава АМг5 к структурным изменениям при повышении температуры.

Структура образцов сплава Д16АТ после плазменной резки существенно отличается от описанной ранее (рис. 6). В этом случае величина макроискажений зоны реза достигает до-

статочно больших значений при высокой скорости резки в режиме № 5 (рис. 6, *a–d*). Для остальных режимов искажения геометрии образцов не так существенны. Наименьшие искажения зоны реза (400–450 мкм) характерны для образцов, полученных в режиме № 4 при скорости резки 4,6 м/мин и энергозатрате 4,6 кДж/м. Размер зоны плавления металла составляет от 100–150 мкм при резке в режиме № 4 до 800–1000 мкм при резке в режиме № 5. Размер зоны термического влияния в основном не превышает 200–300 мкм, что выявляется по её повышенной травимости на металлографических шлифах. Структура в зоне плавления представлена дендритным строением, формируемым



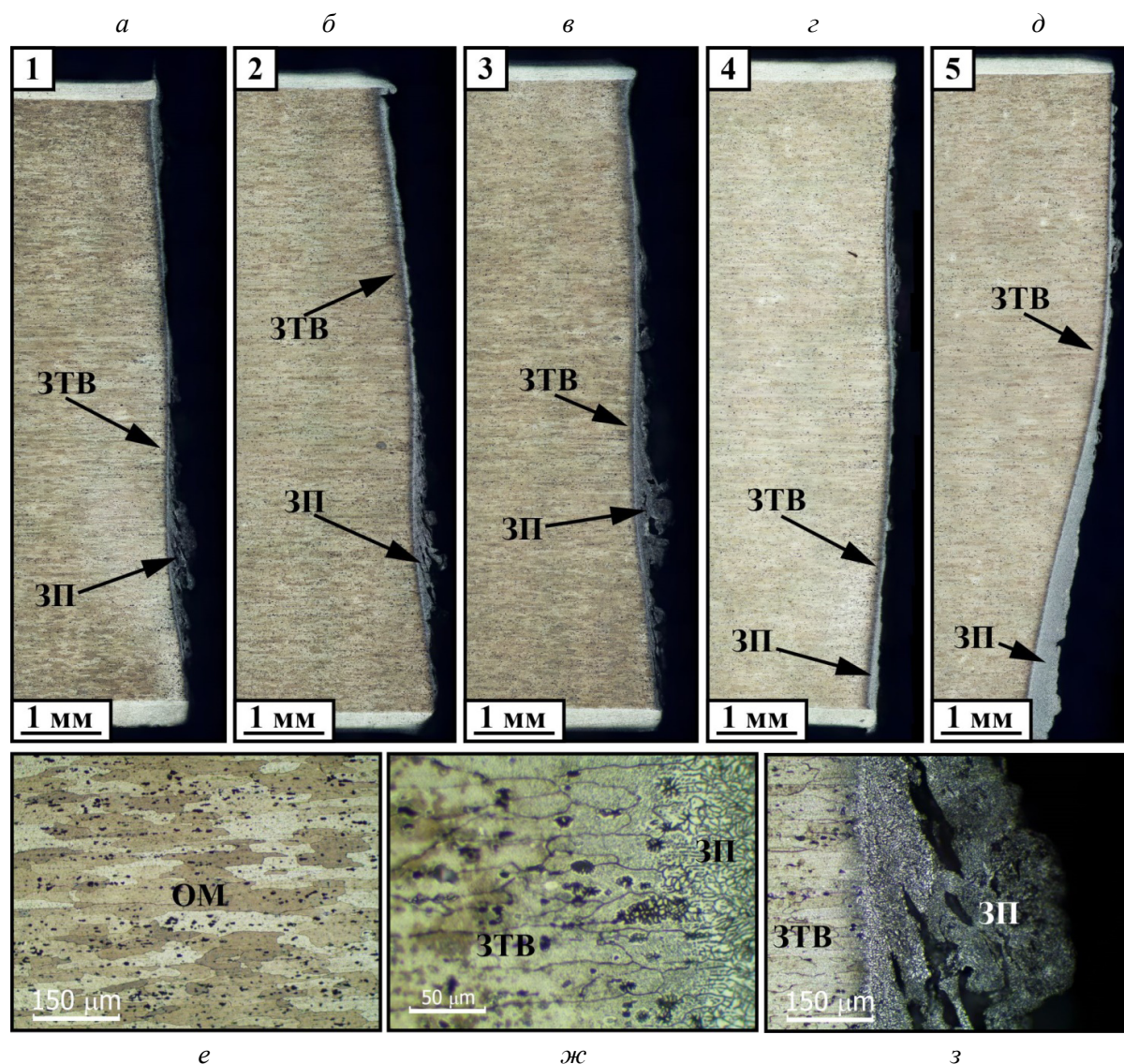


Рис. 6. Структура в зоне резки сплава Д16АТ:

*a–д* – макроструктура реза; *е* – исходная структура материала ОМ; *ж, з* – зоны плавления ЗП и термического влияния ЗТВ

Fig. 6. The structure in the cutting zone of the AA2024 alloy:

the macrostructure of the cut (*a–д*); the initial structure of the base material (*e*); the fusion zones and the heat affected zone (*ж, з*)

при кристаллизации из расплавленного состояния (рис. 6, *ж, з*). Зона термического влияния постепенно переходит в основной металл с неизменной структурой (рис. 6, *е, ж*). Травимость зоны термического влияния повышается в результате перестаривания материала, вызванного избыточным выпадением легирующих элементов из твердого раствора. Такое положение характерно для термически упрочняемого сплава Д16АТ, подвергаемого избыточному термическому воздействию (например, при сварке).

При резке образцов титанового сплава ВТ1-0 строение зоны реза характеризуется невысокими значениями макроискажений, кроме ре-

жимов № 1 и № 5, характеризующихся максимальной и минимальной скоростью резки (рис. 7, *a–д*). При средней скорости резки 3,0 м/мин и энерговложении 7,1 кДж/м в режиме № 3 происходит формирование образцов с наименьшим отклонением геометрии реза, составляющим примерно 450–500 мкм.

Зона плавления для образцов сплава ВТ1-0 представлена дендритным строением (рис. 7, *ж, з*), ее толщина может достигать 150–200 мкм. Зона термического влияния проявляет тенденции к образованию игольчатой структуры (рис. 7, *ж*), что существенно отличает ее от основного металла (рис. 7, *е*). Однако зона термического вли-



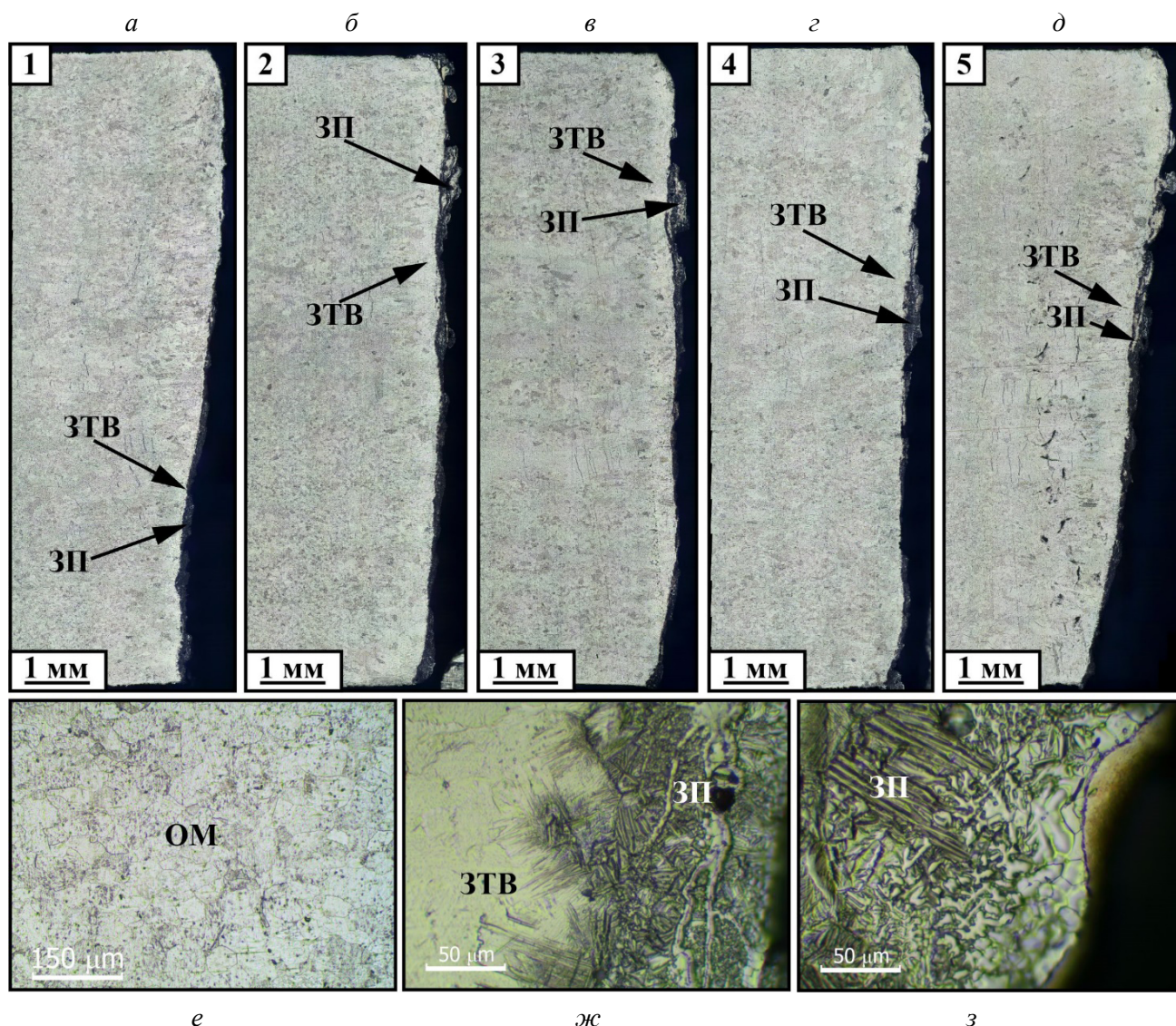


Рис. 7. Структура в зоне резки сплава BT1-0:

*a–д* – макроструктура реза; *e* – исходная структура материала OM; *ж, з* – зоны плавления ЗП и термического влияния ЗТВ

Fig. 7. The structure in the cutting zone of the *Grade2* titanium alloy:

the macrostructure of the cut (*a–д*); the initial structure of the base material (*e*); the fusion zones and the heat affected zone (*ж, з*)

яния для данного сплава обладает достаточно низкой толщиной. Ближе к поверхности реза образцов сплава BT1-0 происходит образование тонких (до 10 мкм толщиной) слоёв (рис. 7, з), содержащих в себе, предположительно, оксиды титана. Как будет показано далее, это приводит к резкому росту микротвердости поверхностных слоев образцов.

Механические свойства в зоне реза образцов согласуются со структурными изменениями (рис. 8). Для образцов сплава AMg5 характерно снижение микротвердости от средней в основном металле 0,83–0,84 ГПа до 0,70–0,75 ГПа вблизи поверхности в зоне плавления. В зоне

термического влияния значения микротвердости имеют промежуточные значения и достаточно близки к микротвердости основного металла. Суммарный размер зоны термического влияния и зоны плавления составляет порядка 500–1000 мкм в зависимости от режима резки. Для образцов, полученных в оптимальном режиме № 2, общая величина макроискажения геометрии и зон термического влияния и плавления составляет примерно 1400 мкм (1,4 мм), что определяет величину требуемого припуска на механическую обработку. В зоне резки образцов сплава Д16АТ снижение микротвердости более существенно. При средней микротвердости



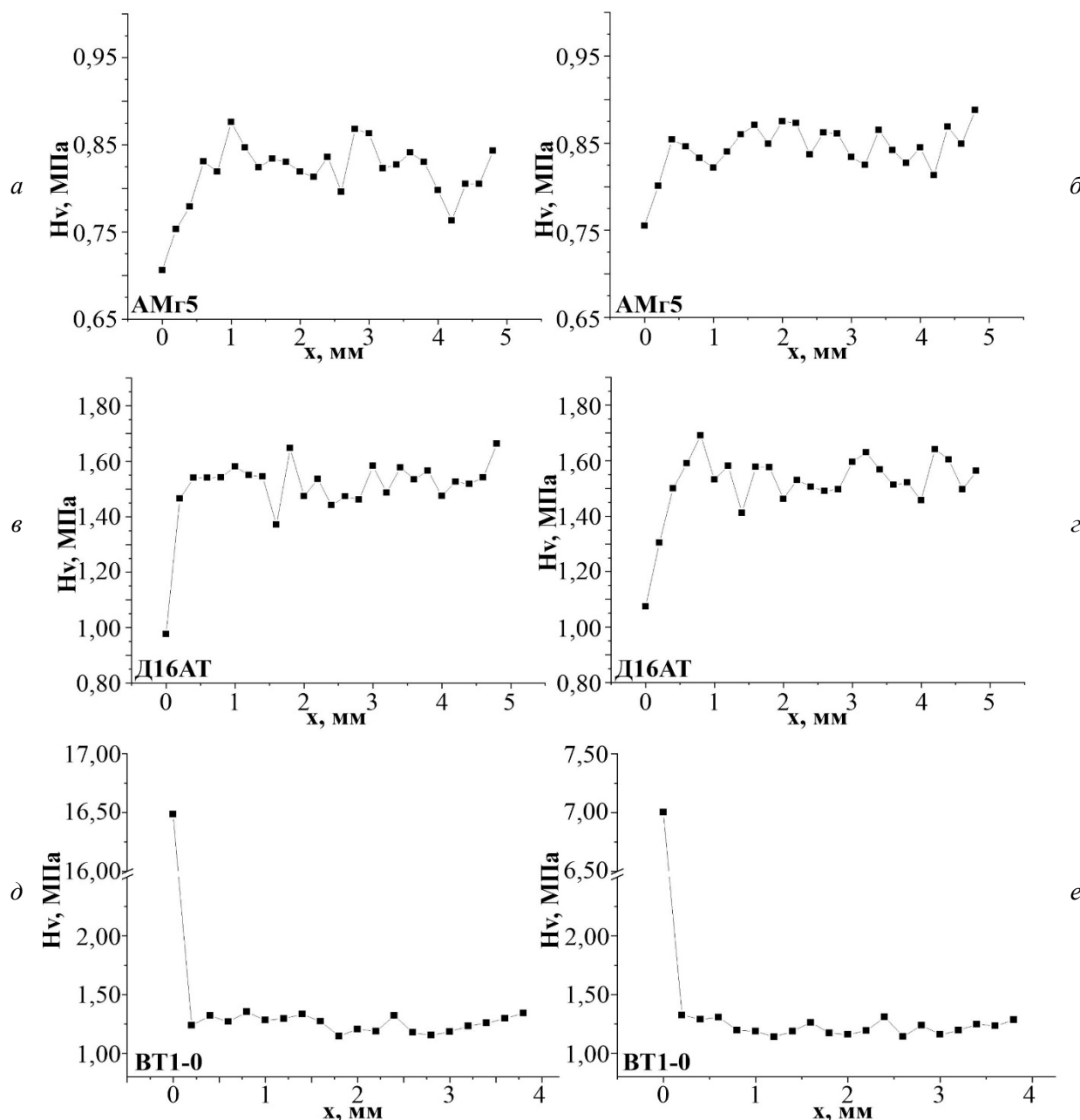


Рис. 8. Изменение микротвердости в типичных образцах после плазменной резки:

*a, б* – сплав АМr5; *в, г* – сплав Д16АТ; *д, е* – сплав ВТ1-0

Fig. 8. Changes in microhardness of typical specimens after plasma cutting:

AA5056 alloy (*a, б*); AA2024 alloy (*в, г*); Grade2 titanium alloy (*д, е*)

в зоне основного металла 1,52–1,53 ГПа микротвердость в зоне плавления снижается до 0,95–1,05 ГПа. При этом общая величина зоны термического влияния и зоны плавления в основном не превышает 500 мкм. Для образцов, полученных в оптимальном режиме № 4, общая величина зон термического влияния и плавления суммарно с величиной макроискажения геометрии реза составляет 600 мкм (0,6 мм). Для сплава ВТ1-0 характерен резкий рост значений микротвердости

в среднем с 1,23–1,24 ГПа в основном металле до 7,0–16,5 ГПа в поверхностных слоях, что свидетельствует о формировании оксидов титана, обладающих высокой твердостью. Обнаруженное в ранее проведенной работе увеличение твердости сплава ОТ4-1 в поверхностных слоях при резке [18] находится на значительно меньшем уровне и обусловлено закалочными эффектами (рост в 1,5 раза в сравнении с основным металлом). Величина зоны плавления и зоны термиче-

ского влияния при этом находится на достаточно низком уровне. Суммарно величины искажения макрогеометрии, зоны плавления и зоны термического влияния составляют для сплава ВТ1-0 примерно 500 мкм (0,5 мм) при резке по оптимальному режиму № 3, что определяет наименьший из требуемых припусков на последующую обработку данного сплава.

### Заключение

Влияние высокоэнергетического воздействия плазменной струи на структуру и свойства сплавов АМг5, Д16АТ и ВТ1-0 сказывается различным образом, что обусловлено как их разной структурой, так и реакцией на термическое воздействие. В то время как для алюминиевых сплавов характерно снижение твердости из-за термической деградации структуры, в титановом сплаве происходит формирование поверхностных слоёв с высокой твердостью. Проведенные исследования показывают, что для выбранных сплавов при относительно равных условиях резки предпочтительными являются различные параметры и режимы резки. Для сплава Д16АТ более предпочтительны режимы с минимальным энергозатратением, в то время как для сплавов АМг5 и ВТ1-0 лучше подходят режимы со средним энергозатратением или выше среднего. Для алюминиевых сплавов при резке характерно разупрочнение приповерхностных слоёв материала, а для титанового сплава нет. Причем при резке титанового сплава ВТ1-0 в поверхностных слоях формируются окисные плёнки с твердостью, значительно (более чем в 10 раз) превышающей твердость основного металла, что может приводить к повышенной интенсивности износа инструмента при последующей механической обработке. Для сплава АМг5 при резке характерно снижение микротвердости на величину до 10 % в сравнении с основным металлом. В зоне термического влияния сплава Д16АТ разупрочнение существенно выше и составляет до 50 % по отношению к исходной структуре листового проката. Для данных сплавов также отмечаются различные особенности искажений макрогеометрии в области реза. Наиболее существенными отклонениями обладают образцы сплава АМг5, меньшими и относительно близкими значениями отклонений характеризуются сплавы Д16АТ

и ВТ1-0. Причем в условиях эксперимента даже при оптимальных значениях параметров резки в образцах сплава АМг5 остаются ещё достаточно значительные искажения геометрии реза, что требует дальнейших исследований для улучшения качества реза. В целом использованные режимы резки позволяют изготавливать заготовки из сплава АМг5, Д16АТ и ВТ1-0 толщиной 10 мм с величиной припуска на последующую обработку 1,4, 0,6 и 0,5 мм соответственно.

### Список литературы

1. Tribological and electric contact resistance properties of pulsed plasma duplex treatments on a low alloy steel / J. Murua, I. Ibañez, A. Dianova, S. Domínguez-Meister, O. Larrañaga, A. Larrañaga, I. Braceras // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 454. – P. 129155. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.129155.
2. Structure and properties of CrN/TiN multilayer coatings produced by cathodic arc plasma deposition on copper and beryllium-copper alloy / A.V. Kolubaev, O.V. Sizova, Yu.A. Denisova, A.A. Leonov, N.V. Teryukalova, O.S. Novitskaya, A.V. Byeli // *Physical Mesomechanics*. – 2022. – Vol. 25 (4). – P. 306–317. – DOI: 10.1134/S102995992204004X.
3. Microstructure evolution and mechanical properties of plasma sprayed AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high-entropy alloy coatings / L. Wang, F. Zhang, H. Ma, S. He, F. Yin // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 471. – P. 129924. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129924.
4. Akkurt A. The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy // *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2015. – Vol. 18 (3). – P. 303–308. – DOI: 10.1016/j.jestch.2014.07.004.
5. Ilii S.M., Coteatǎ M. Plasma arc cutting cost // *International Journal of Material Forming*. – 2009. – Vol. 2 (1). – P. 689–692. – DOI: 10.1007/s12289-009-0588-4.
6. Experimental study of the features of the kerf generated by a 200A high tolerance plasma arc cutting system / R. Bini, B.M. Colosimo, A.E. Kutlu, M. Monno // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2008. – Vol. 196 (1–3). – P. 345–355. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.061.
7. Optimization of surface roughness in plasma arc cutting of AISI D2 steel using TLBO / P. Patel, B. Nakum, K. Abhishek, V. Rakesh Kumar, A. Kumar // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5, iss. 9 (3). – P. 18927–18932. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.242.

8. *Hoult A.P., Pashby I.R., Chan K.* Fine plasma cutting of advanced aerospace materials // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1995. – Vol. 48 (1–4). – P. 825–831. – DOI: 10.1016/0924-0136(94)01727-I.
9. *Nandan Sharma D., Ram Kumar J.* Optimization of dross formation rate in plasma arc cutting process by response surface method // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 32 (3). – P. 354–357. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.605.
10. *Gariboldi E., Previtali B.* High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 160 (1). – P. 77–89. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.
11. An experimental analysis of cutting quality in plasma arc machining / M. Gostimirović, D. Rodić, M. Sekulić, A. Aleksić // *Advanced Technologies & Materials*. – 2020. – Vol. 45 (1). – P. 1–8. – DOI: 10.24867/ATM-2020-1-001.
12. *Cinar Z., Asmael M., Zeeshan Q.* Developments in plasma arc cutting (PAC) of steel alloys: A review // *Jurnal Kejuruteraan*. – 2018. – Vol. 30 (1). – P. 7–16. – DOI: 10.17576/jkukm-2018-30(1)-02.
13. *Kudrna L., Fries J., Merta M.* Influences on plasma cutting quality on CNC machine // *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*. – 2019. – Vol. 2 (1). – P. 108–117. – DOI: 10.2478/mape-2019-0011.
14. Влияние конструктивных особенностей плазматрона на качество реза при прецизионной воздушно-плазменной разделке металла / С.В. Анахов, Б.Н. Гузанов, А.В. Матушкин, Н.Б. Пугачева, Ю.А. Пыкин // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. – 2020. – Т. 63 (2). – С. 155–162. – DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-155-162.
15. Modeling and optimization of cut quality responses in plasma jet cutting of aluminium alloy EN AW-5083 / I. Peko, D. Marić, B. Nedić, I. Samardžić // *Materials*. – 2021. – Vol. 14 (19). – P. 5559. – DOI: 10.3390/ma14195559.
16. *Salonitis K., Vatousianos S.* Experimental investigation of the plasma arc cutting process // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 3. – P. 287–292. – DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.050.
17. *Suresh A., Diwakar G.* Optimization of process parameters in plasma arc cutting for TWIP steel plates // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 38 (5). – P. 2417–2424. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.383.
18. Оработка методики плазменной резки меди марки М1, алюминиевого сплава Д16Т и титанового сплава ОТ4-1 с использованием плазматрона с обратной полярностью / В.Е. Рубцов, А.О. Панфилов, Е.О. Княжев, А.В. Николаева, А.М. Черемнов, А.В. Гусарова, В.А. Белобородов, А.В. Чумаевский, А.Н. Иванов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 33–52. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-33-52.
19. *Matushkina I., Anakhov S., Pyckin Yu.* Design of a new gas-dynamic stabilization system for a metal-cutting plasma torch // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2094. – P. 042075. – DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042075.
20. *Shchitsyn V.Yu., Yazovskikh V.M.* Effect of polarity on the heat input into the nozzle of a plasma torch // *Welding International*. – 2002. – Vol. 16 (6). – P. 485–487. – DOI: 10.1080/09507110209549563.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





# Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Influence of high-energy impact during plasma cutting on structure and properties of surface layers of aluminum and titanium alloys

Valery Rubtsov<sup>1, a, \*</sup>, Alexander Panfilov<sup>1, b</sup>, Evgeny Knyazhev<sup>1, c</sup>, Alexandra Nikolaeva<sup>1, d</sup>,  
 Andrey Cheremnov<sup>1, e</sup>, Anastasia Gusarova<sup>1, f</sup>, Vladimir Beloborodov<sup>1, g</sup>, Andrey Chumaevskii<sup>1, h</sup>,  
 Artem Grinenko<sup>2, i</sup>, Evgeny Kolubaev<sup>1, k</sup>

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>2</sup> ITS-Siberia LLC, 16a Severnoe Shosse, Krasnoyarsk, 660118, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0348-1869>, [rvy@ispms.tsc.ru](mailto:rvy@ispms.tsc.ru); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8648-0743>, [alexpl@ispms.ru](mailto:alexpl@ispms.ru);  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1984-9720>, [clothoid@ispms.tsc.ru](mailto:clothoid@ispms.tsc.ru); <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8708-8540>, [nikolaeva@ispms.tsc.ru](mailto:nikolaeva@ispms.tsc.ru);  
<sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2225-8232>, [amc@ispms.tsc.ru](mailto:amc@ispms.tsc.ru); <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4208-7584>, [gusarova@ispms.ru](mailto:gusarova@ispms.ru);  
<sup>g</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, [vabel@ispms.tsc.ru](mailto:vabel@ispms.tsc.ru); <sup>h</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, [tch7av@gmail.com](mailto:tch7av@gmail.com);  
<sup>i</sup> <https://orcid.org/0009-0002-9511-1303>, [giga2011@yandex.ru](mailto:giga2011@yandex.ru); <sup>k</sup> <https://orcid.org/0000-0001-7288-3656>, [eak@ispms.tsc.ru](mailto:eak@ispms.tsc.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 26 September 2023

Revised: 11 October 2023

Accepted: 18 October 2023

Available online: 15 December 2023

##### Keywords:

Plasma cutting

Ti-4Al-1Mn titanium alloy

Grade2 titanium alloy

Macrostructure

Aluminum alloy AA2124

Aluminum alloy AA5056

Heat affected zone

Change of mechanical properties of material

##### Funding

The results were obtained in the framework of the Integrated Project "Establishment of production of high-tech equipment for adaptive high-precision plasma heavy cutting of non-ferrous metals for the metallurgical, aerospace and transport industries of the Russian Federation" (Agreement No. 075-11-2022-012 dated April 06, 2022) implemented by the ISPMS SB RAS at the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of Decree of the Government of the Russian Federation No. 218 dated April 09, 2010.

##### Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

#### ABSTRACT

**Introduction.** Plasma cutting of various metals and alloys is one of the most productive processes for obtaining workpieces, especially when using reverse polarity plasmatrons. The use of plasma cutting in the production of workpieces of large thicknesses potentially allows to increase the productivity of the process. In the domestic industry plasma cutting equipment of foreign production is widely used, which poses the problem of import substitution of manufactured products and equipment with the corresponding parts of Russian companies. For this reason, at present the Institute of Strength Physics and Materials Science together with the company "ITS Siberia" develops plasma cutting equipment on reverse polarity currents. At the same time, in order to determine the peculiarities of influence of parameters and modes of plasma cutting process on the structure of metal in the cutting zone, it is necessary to conduct comparative studies on different metals and alloys. **Aim of the work:** is to identify the characteristics of the influence of high energy impact on the structure and properties of surface layers of aluminum and titanium alloys during plasma cutting using a plasma torch operating with reverse polarity currents. **The research methods** are optical metallography, microhardness measurement and laser scanning microscopy of the surface after plasma cutting. **Results and discussions.** The conducted researches show a wide range of possibilities to adjust the process parameters of plasma cutting of aluminum alloys AA5056 and AA2124, and titanium alloy Grade2. For the alloys used in this work there are optimal values of process parameters, deviations from which lead to various violations of cut quality. Aluminum alloys show a tendency to significant de-strengthening in the cutting zone, which is associated with the formation of a large crystalline structure and large incoherent secondary phases with simultaneous depletion of the solid solution with alloying elements. Titanium alloys are characterized by quenching effects in the cutting zone with increasing microhardness values. Oxides are also formed in the surface layers despite the use of nitrogen shielding gas. In the alloy Ti-4Al-1Mn, in the previously conducted works, the formation of oxide films with high hardness is not noted, while in the Grade2 alloy at cutting in the surface layers oxides are formed sharply increasing the values of microhardness of the material up to values of about 15 GPa. This situation can complicate mechanical processing of titanium alloys after plasma cutting. The obtained results indicate a rather low value of the allowance for further machining after plasma cutting of aluminum and titanium alloys.

**For citation:** Rubtsov V.E., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Nikolaeva A.V., Cheremnov A.M., Gusarova A.V., Beloborodov V.A., Chumaevskii A.V., Grinenko A.V., Kolubaev E.A. Influence of high-energy impact during plasma cutting on structure and properties of surface layers of aluminum and titanium alloys. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 216–231. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-216-231. (In Russian).

#### \* Corresponding author

Rubtsov Valery E., Leading researcher  
 Institute of Strength Physics and Materials Science  
 of the Siberian Branch of the RAS,  
 2/4, pr. Akademicheskii,  
 Tomsk, 634055, Russian Federation  
 Tel.: +7 (382) 228-68-63, e-mail: [rvy@ispms.ru](mailto:rvy@ispms.ru)

## References

1. Murua J., Ibañez I., Dianova A., Domínguez-Meister S., Larrañaga O., Larrañaga A., Bracerías I. Tribological and electric contact resistance properties of pulsed plasma duplex treatments on a low alloy steel. *Surface and Coatings Technology*, 2016, vol. 454, p. 129155. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2022.129155.
2. Kolubaev A.V., Sizova O.V., Denisova Yu.A., Leonov A.A., Teryukalova N.V., Novitskaya O.S., Byeli A.V. Structure and properties of CrN/TiN multilayer coatings produced by cathodic arc plasma deposition on copper and beryllium-copper alloy. *Physical Mesomechanics*, 2022, vol. 25 (4), pp. 306–317. DOI: 10.1134/S102995992204004X.
3. Wang L., Zhang F., Ma H., He S., Yin F. Microstructure evolution and mechanical properties of plasma sprayed AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> eutectic high-entropy alloy coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 471, p. 129924. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129924.
4. Akkurt A. The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2015, vol. 18 (3), pp. 303–308. DOI: 10.1016/j.jestch.2014.07.004.
5. Ilii S.M., Coteată M. Plasma arc cutting cost. *International Journal of Material Forming*, 2009, vol. 2 (1), pp. 689–692. DOI: 10.1007/s12289-009-0588-4.
6. Bini R., Colosimo B.M., Kutlu A.E., Monno M. Experimental study of the features of the kerf generated by a 200A high tolerance plasma arc cutting system. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 196 (1–3), pp. 345–355. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.061.
7. Patel P., Nakum B., Abhishek K., Rakesh Kumar V., Kumar A. Optimization of surface roughness in plasma arc cutting of AISI D2 steel using TLBO. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 9 (3), pp. 18927–18932. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.242.
8. Hoult A.P., Pashby I.R., Chan K. Fine plasma cutting of advanced aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, vol. 48 (1–4), pp. 825–831. DOI: 10.1016/0924-0136(94)01727-I.
9. Nandan Sharma D., Ram Kumar J. Optimization of dross formation rate in plasma arc cutting process by response surface method. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 32 (3), pp. 354–357. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.605.
10. Gariboldi E., Previtali B. High tolerance plasma arc cutting of commercially pure titanium. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, vol. 160 (1), pp. 77–89. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.366.
11. Gostimirović M., Rodić D., Sekulić M., Aleksić A. An experimental analysis of cutting quality in plasma arc machining. *Advanced Technologies & Materials*, 2020, vol. 45 (1), pp. 1–8. DOI: 10.24867/ATM-2020-1-001.
12. Cinar Z., Asmael M., Zeeshan Q. Developments in plasma arc cutting (PAC) of steel alloys: A review. *Jurnal Kejuruteraan*, 2018, vol. 30 (1), pp. 7–16. DOI: 10.17576/jkukm-2018-30(1)-02.
13. Kudrna L., Fries J., Merta M. Influences on plasma cutting quality on CNC machine. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 2019, vol. 2 (1), pp. 108–117. DOI: 10.2478/mape-2019-0011.
14. Anakhov S.V., Guzanov B.N., Matushkin A.V., Pugacheva N.B., Pykin Y.A. Vliyanie konstruktivnykh osobennostei plazmotrona na kachestvo reza pri pretsizionnoi vozdušno-plazmennoi razdelke metalla [Influence of plasma torch design on cutting quality during precision air-plasma cutting of metal]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2020, vol. 63 (2), pp. 155–162. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-2-155-162.
15. Peko I., Marić D., Nedić B., Samardžić I. Modeling and optimization of cut quality responses in plasma jet cutting of aluminium alloy EN AW-5083. *Materials*, 2021, vol. 14 (19), p. 5559. DOI: 10.3390/ma14195559.
16. Salonitis K., Vatousianos S. Experimental investigation of the plasma arc cutting process. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 3, pp. 287–292. DOI: 10.1016/j.procir.2012.07.050.
17. Suresh A., Diwakar G. Optimization of process parameters in plasma arc cutting for TWIP steel plates. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38 (5), pp. 2417–2424. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.383.
18. Rubtsov V.E., Panfilov A.O., Knyazhev E.O., Nikolaeva A.V., Cheremnov A.M., Gusarova A.V., Beloborodov V.A., Chumaevskii A.V., Ivanov A.N. Obrabotka metodiki plazmennoi rezki medi marki M1, alyuminievogo splava D16T i titanovogo splava OT4-1 s ispol'zovaniem plazmotrona s obratnoi polyarnost'yu [Development of plasma cutting technique for C1220 copper, AA2024 aluminum alloy, and Ti-1,5Al-1,0Mn

titanium alloy using a plasma torch with reverse polarity]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 33–52. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-33-52.

19. Matushkina I., Anakhov S., Pyckin Yu. Design of a new gas-dynamic stabilization system for a metal-cutting plasma torch. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2094, p. 042075. DOI: 10.1088/1742-6596/2094/4/042075.

20. Shchitsyn V.Yu., Yazovskikh V.M. Effect of polarity on the heat input into the nozzle of a plasma torch. *Welding International*, 2002, vol. 16 (6), pp. 485–487. DOI: 10.1080/09507110209549563.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).