

УДК 621.785 : 669.14.08.29

# ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТИТАНА VT1-0 ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ НАУГЛЕРОЖИВАНИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

© 2013 г. Ю. Ф. Иванов, Е. А. Будовских, В. Е. Громов, Л. П. Бащенко, С. В. Райков

Институт сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН, г. Томск  
Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ), г. Новокузнецк

**Ю. Ф. Иванов** – докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ИСЭ СО РАН (634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3). Тел.: (3822) 49-19-47. E-mail: yufi55@mail.ru.

**Е. А. Будовских** – докт. техн. наук, проф. кафедры физики СибГИУ (654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42). Тел.: (3843) 46-22-47. Факс: (3843) 46-57-92. E-mail: budovskih\_ea@physics.sibsiu.ru.

**В. Е. Громов** – докт. физ.-мат. наук, проф., зав. этой кафедрой. Тел.: (3843) 78-43-66. Факс: (3843) 46-57-92. E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru.

**Л. П. Бащенко** – вед. редактор журнала «Изв. вузов. Чер. металлургия». Тел.: (3843) 46-22-77. E-mail: budovskih\_ea@physics.sibsiu.ru.

**С. В. Райков** – канд. техн. наук, соискатель кафедры физики СибГИУ. Тел.: (3843) 46-22-77. E-mail: vest2002@mail.ru.

Осуществлено электровзрывное науглероживание с последующей электронно-пучковой обработкой поверхности титана. Результатом комбинированной обработки стало увеличение микротвердости облучаемой поверхности в 14 раз. Методами сканирующей электронной микроскопии исследованы морфология поверхности покрытия, формирующегося на обрабатываемой поверхности, строение и элементный состав легированного слоя в зависимости от поглощаемой плотности мощности при электронно-пучковой обработке.

**Ключевые слова:** титан, электровзрывное легирование, науглероживание, электронно-пучковая обработка, сканирующая электронная микроскопия, структурно-фазовые состояния.

Electric-explosive carburizing followed by electron-beam processing of titanium surface has been carried out. As a result of such combined processing, the processed surface microhardness is increased 14 times. Scanning electron microscope was used for studying the morphology of the coating formed on the processed surface, the structure and elemental composition of the alloyed zone depending on the absorbed power density during electron-beam processing.

**Key words:** titanium, electro-explosive alloying, carburizing, scanning electron microscopy, structure-phase state.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов упрочнения и защиты поверхности металлов и сплавов является электровзрывное легирование, суть которого состоит в получении новых структурно-фазовых состояний поверхностных слоев при обработке импульсными плазменными струями, сформированными продуктами электрического взрыва проводников, с последующей самозакалкой [1]. Титан и его сплавы характеризуются высокой пластичностью, отсутствием хладноломкости, высокой прочностью и коррозионной стойкостью, особенно в окислительных и хлорированных средах, и широко применяются как конструкционные материалы в технике. Вместе с тем они обладают низкой износостойкостью, высокой склонностью к налипанию и большим коэффициентом трения в паре практически со всеми материалами [2]. Эти недостатки ограничивают их применение для изготовления деталей, работающих, прежде всего, на трение.

В связи с этим проводятся исследования по разработке новых методов упрочнения титановых сплавов с использованием концентрированных потоков энергии – таких, как токи высокой частоты, лазерное излучение, электронные пучки, плазменные потоки и струи. В частности, разрабатываются и находят применение методы поверхностного науглероживания, основная идея которых состоит в импульсном оплавлении и насыщении поверхностных слоев углеродом с последующими кристаллизацией и образованием упрочняющей фазы карбида титана. В силу кристаллизации на подложке модифицированные слои имеют адгезионно-когезионную связь с основой и незначительно изменяют размеры детали. Ранее [3] было показано, что после науглероживания титана с использованием электрического взрыва углеграфитовых волокон по всей глубине зоны оплавления и легирования наблюдается структурно-свободный углерод в виде изолированных частиц, образующихся при разрушении волокон. Такая структура обуславливает возможность

ее дальнейшей модификации с целью растворения графита и увеличения содержания карбида титана.

Цель настоящей работы – анализ структуры и распределения микротвердости по глубине технически чистого титана VT1-0 после комбинированной обработки, сочетающей электровзрывное науглероживание и последующую импульсно-периодическую электронно-пучковую обработку (ЭПО).

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала основы был использован технически чистый титан марки VT1-0. Образцы имели форму шайб толщиной 5 мм и диаметром 20 мм. Науглероживание осуществляли облучением поверхности импульсной плазменной струей, сформированной из продуктов электрического взрыва углеродной ленты марки ЛУ-П/0,1-50 (ООО «Аргон», г. Балаково). Каждое волокно состояло из тысяч отдельных нитей, параллельных друг другу.

Электровзрывное легирование проводили на установке ЭВУ 60/10 [1] при времени импульса 100 мкс и поглощаемой образцом мощности 6,5 ГВт/м<sup>2</sup>. Для формирования струи применяли плазменный ускоритель, состоящий из коаксиально-торцевой системы токоподводящих электродов, разрядной камеры, локализирующей продукты взрыва, и сопла, по которому они истекали в вакуумную технологическую камеру.

Электровзрыв происходит в результате пропуска через проводник импульса тока большой плотности при разряде конденсаторной батареи. Продукты взрыва представляют собой многофазную систему, включающую как плазменный компонент, так и конденсированные частицы различной дисперсности [1]. При распространении струи в пространстве конденсированные частицы отстают от плазменного компонента [1], поэтому при ее нормальном натекании на облучаемую поверхность сначала происходят плазменный нагрев и оплавление материала подложки, а затем – осаждение на облучаемой поверхности частиц из тыла струи.

Характерное изображение структуры поверхности показано на рис. 1. Видно, что она имеет развитый рельеф, образованный, в том числе, обрывками волокон, которые пересекают поверхность под различными углами. Это говорит о том, что они хорошо смачиваются расплавом титана, вследствие чего принимают в объем зоны легирования [1, 3].

Последующую электронно-пучковую обработку проводили на установке «Соло» [4]. Остаточное давление в вакуумной камере составляло 0,02 Па, энергия электронов – 18 кэВ, плотность энергии

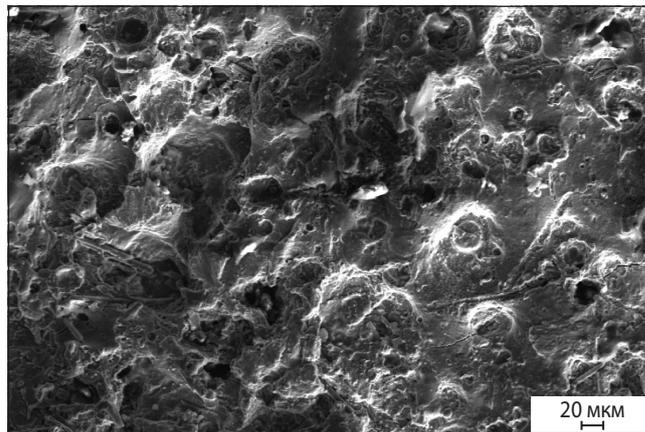


Рис. 1. Характерное изображение структуры поверхности зоны электровзрывного науглероживания титана (СЭМ)

пучка  $E_s = 45$  (режим 1), 50 (режим 2) и 55 (режим 3) Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса  $\tau = 200$  мкс, частота их следования – 0,3 Гц, число импульсов  $N = 10$ .

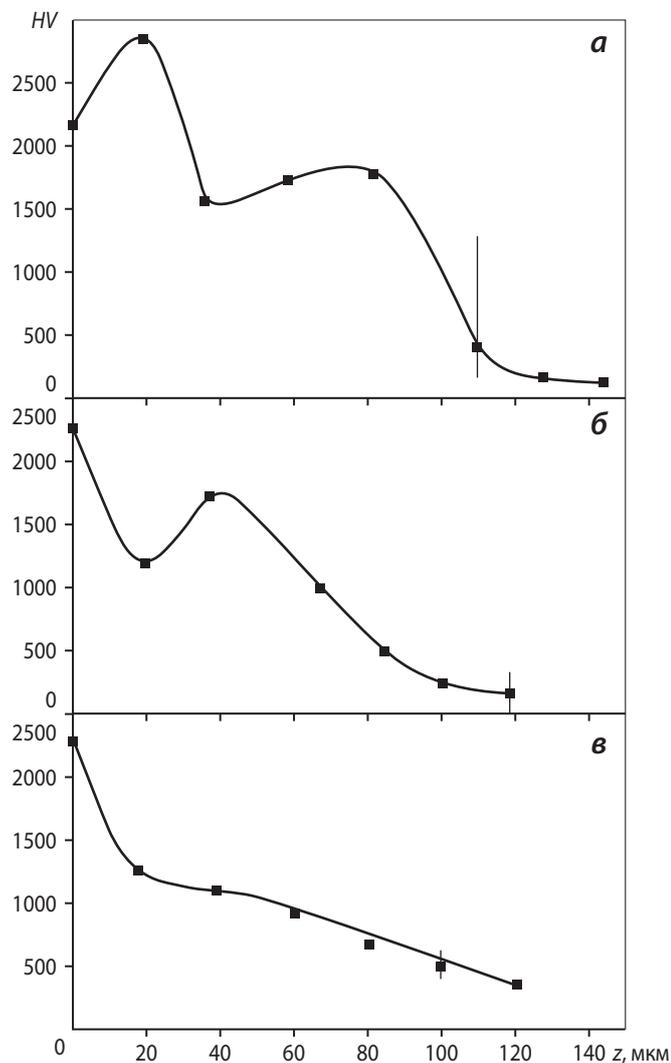
Микротвердость определяли с использованием прибора HVS-1000A с точностью  $\pm 10$  %. Исследование структуры поперечных шлифов обработанных образцов осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе LEO EVO 50.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После комбинированной обработки происходит увеличение микротвердости облученной поверхности в 14 раз (рис. 2). Этот показатель слабо зависит от режима облучения электронным пучком и изменяется в пределах 2200–2250 HV. При этом после обработки в режиме 1 его максимальное значение, равное 2700 HV, достигается не на поверхности, а на глубине  $z \sim 20$  мкм. Еще один локальный максимум микротвердости со значением 1800 HV наблюдается при  $z \sim 80$  мкм.

При обработке в режимах 2 и 3 максимальная микротвердость достигается на поверхности. В случае режима 2 на глубине  $\sim 40$  мкм также имеется ее локальный максимум с уровнем до 2000 HV, а при обработке в режиме 3, с учетом точности измерений, он становится малозаметным. Увеличение плотности энергии пучка электронов в пределах от 45 до 55 Дж/см<sup>2</sup> при других неизменных параметрах приводит к уменьшению толщины слоев, в которых микротвердость превышает 2000, 1500 и 1000 HV. При этом толщина зоны упрочнения практически не зависит от плотности энергии пучка электронов и составляет 110–120 мкм.

Очевидно, что выявленные особенности поведения микротвердости определяются структурно-фа-



**Рис. 2.** Профили микротвердости образцов технического титана ВТ1-0, подвергнутого электровзрывному легированию углеродом и последующей электронно-пучковой обработке

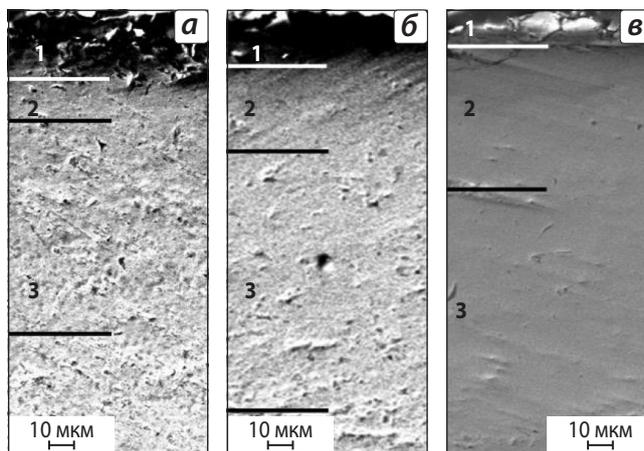
Обозначена толщина упрочненного поверхностного слоя

Режимы электронно-пучковой обработки:  $N = 10$  имп.,  $\tau = 200$  мкс,  $E_z = 45$  (а), 50 (б) и 55 (в) Дж/см<sup>2</sup>

а-в соответствуют режимам 1-3

зовым состоянием приповерхностных слоев. Следует отметить, что независимо от режима ЭПО в зоне упрочнения формируется градиентная структура, в которой условно можно выделить три слоя: поверхностный слой (1) покрытия, промежуточный слой (2) зоны легирования и переходный слой (3) зоны термического влияния (рис. 3).

Поверхностный слой 1 образуется в результате воздействия на образец плазмы и конденсированных частиц, возникающих при разрушении углеграфитовых волокон и летящих в тылу многофазной плазменной струи продуктов взрыва [1, 5]. Можно говорить, что он представляет собой покрытие на

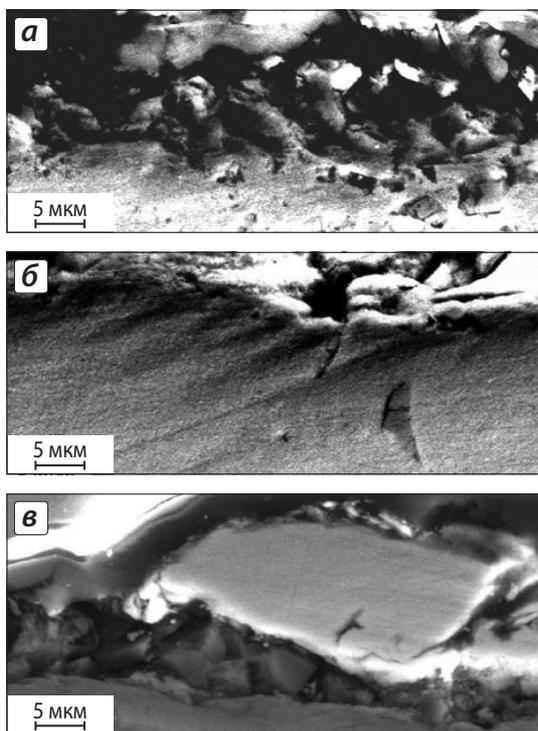


**Рис. 3.** Многослойная структура, формирующаяся в поверхностном слое образца ВТ1-0, подвергнутого электровзрывному легированию углеродом и последующей электронно-пучковой обработке

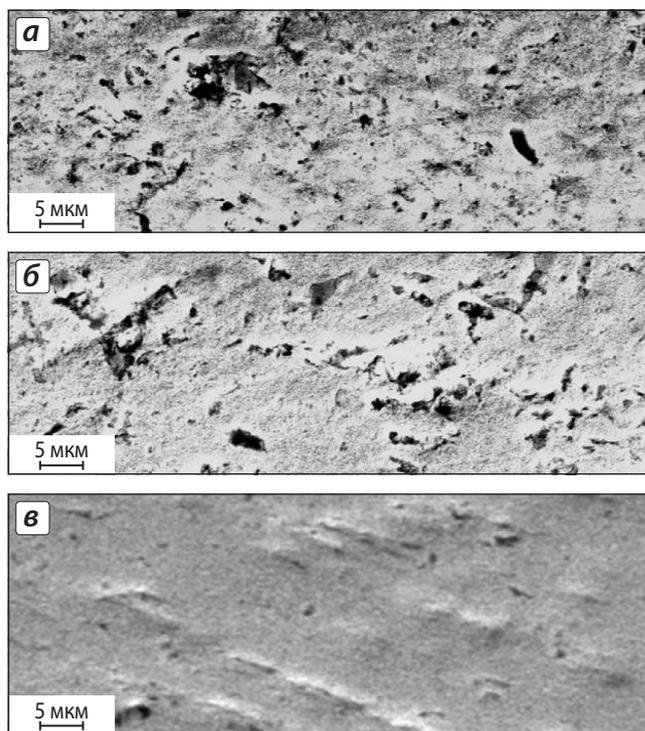
а-в соответствуют режимам 1-3

поверхности титана. Увеличение плотности энергии пучка электронов в интервале 45–55 Дж/см<sup>2</sup> приводит к снижению толщины слоя 1 и росту размеров слоев 2 и 3. По-видимому, это связано с более интенсивным растворением в материале основы частиц углеграфитовых волокон, образующих покрытие, а также с более глубоким оплавлением зоны электровзрывного науглероживания и большим временем жизни расплава. Характерные изображения структуры поперечного сечения слоя покрытия приведены на рис. 4. Видно, что формирующийся поверхностный слой 1 после ЭПО в режиме 1 имеет большее количество микропор и более грубую структуру, чем при осуществлении режимов 2 и 3.

Промежуточный слой 2, располагающийся под покрытием и выявляемый на поперечном сечении шлифов, характеризуется относительно гладким рельефом (рис. 3 и 5). При этом с увеличением плотности энергии пучка электронов шероховатость данного слоя снижается (см. рис. 5). Действительно, после обработки в режиме 1 в слое присутствуют частицы углеграфитовых волокон, проникшие при электровзрывном науглероживании в глубь расплава и не растворившиеся в нем вследствие малого времени обработки. Об этом говорит то, что при использовании СЭМ в отраженных электронах контраст изображения определяется плотностью материала (относительной атомной массой), поэтому углерод, имеющий меньшую атомную массу по сравнению с титаном, на изображениях формирует более темные области материала. По результатам исследований, представленным на рис. 5, б, г, е, можно заключить, что присутствующие в промежуточном слое частицы второй



**Рис. 4.** Структура поверхностного слоя, формирующегося в образцах ВТ1-0, подвергнутых электровзрывному легированию углеродом и последующей электронно-пучковой обработке по режимам 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

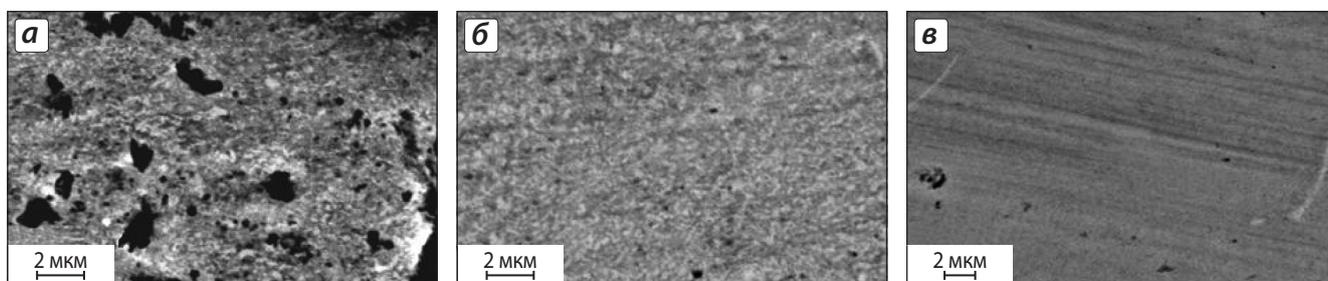


**Рис. 6.** Структура переходного слоя, формирующегося при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке образцов по режимам 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

фазы обогащены углеродом и, по-видимому, являются частицами углеграфитовых волокон, имеющими вытянутую форму и пересекающими плоскость шлифа под различными углами. Их размеры изменяются в пределах от 100 до 400 нм. После обработки в режиме 1 (рис. 5, а, б) частицы второй фазы располагаются группами, размеры которых изменяются от 0,8 до 1,2 мкм. Очевидно, формирование таких групп происходит в результате растворения частиц углеграфитовых волокон, внесенных при ЭВЛ в зону легирования, при последующей ЭПО. При увеличении плотности энергии пучка электронов размеры частиц второй фазы уменьшаются, плотность частиц (количество частиц на единицу длины секущей) снижается.

После обработки в режиме 2 (см. рис. 5, в, г) на изображении структуры промежуточного слоя наблюдается пятнистый контраст, соответствующий, по-видимому, зеренно-субзеренной структуре титана и частицам карбида титана. Размеры элементов контраста изменяются в пределах от 250 до 350 нм.

Переходный слой 3 является более рельефным по сравнению с промежуточным слоем (см. рис. 3), что говорит о его сильно неоднородном структурно-фазовом состоянии. С повышением плотности энергии пучка электронов шероховатость слоя 3 снижается, что может быть связано с формированием в нем более однородных структуры и фазового состава (рис. 6).



**Рис. 5.** Структура промежуточного слоя, формирующегося при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке образцов по режимам 1 (а), 2 (б) и 3 (в)

## ВЫВОДЫ

1. Комбинированная обработка поверхности титана марки ВТ1-0, сочетающая науглероживание электро-взрывом углеграфитовых волокон и последующее переплавление поверхности легирования высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности, обеспечивает увеличение ее микротвердости до 14 раз. При этом данный показатель слабо зависит от плотности энергии пучка электронов, а толщина упрочненного слоя, в котором микротвердость превышает 2000, 1500 и 1000 НV, уменьшается с ростом плотности энергии пучка электронов.

2. Комбинированная обработка сопровождается формированием на поверхности слоя покрытия, промежуточного слоя зоны легирования и переходного слоя зоны термического влияния.

3. Увеличение плотности энергии пучка электронов в пределах от 45 до 55 Дж/см<sup>2</sup> приводит к снижению толщины покрытия и росту толщины промежуточного и переходного слоев, к уменьшению пористости и измельчению структуры покрытия, к снижению количества частиц электрически взрывааемых углеграфитовых волокон, выявляемых в промежуточном и переходном слоях.

Работа выполнена

при поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

(гос. контракт № 14.740.11.0813) и грантов РФФИ (проекты № 11-02-91150-ГФЕН-а,

№ 11-02-12091-офи-м-2011 и № 11-08-98020-р\_сибирь\_а).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Багаутдинов А. Я., Будовских Е. А., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007.
2. Колачев Б. А., Елисеев Ю. С., Братухин А. Г., Талалаев В. Д. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники / Под ред. А. Г. Братухина. М.: Изд-во МАИ, 2001.
3. Бащенко Л. П., Соскова Н. А., Будовских Е. А. и др. // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 3. С. 15.
4. Иванов Ю. Ф., Карпий С. В., Морозов М. М. и др. Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки. Новокузнецк: Изд-во НПК, 2010.
5. Будовских Е. А., Багаутдинов А. Я., Вострцова А. В., Громов В. Е. // Изв. вузов. Физика. 2008. № 5. С. 71.

Издательский Дом МИСиС представляет:

## Организация эксперимента: планы второго порядка и исследование области оптимума

### Учебное пособие

**Авторы:** В. Ю. Лопатин, В. Н. Шуменко

М.: ИД МИСиС, 2011. – 46 с.

Описаны композиционные планы второго порядка, которые позволяют изучить влияние факторов и получить зависимость параметра оптимизации в виде уравнений второй степени. Главной особенностью планов второго порядка является то, что они могут быть получены из планов ПФЭ или ДФЭ путем «добавления» необходимых экспериментов и последующего пересчета коэффициентов уравнения. Преобразование уравнения к каноническому виду позволяет найти область оптимума и построить изолинии равного значения параметра оптимизации в зависимости от изменения значений факторов. На конкретном примере показаны влияние факторов и построение изолиний. Для самоконтроля приведено несколько примеров использования планов второго порядка, взятых из научно-исследовательских работ.

Издание соответствует программе курса «Организация эксперимента» и предназначено для обучения бакалавров и магистров по направлению 150400.

♦ ♦ ♦ ♦

Учебное пособие можно купить в книжном павильоне Издательского Дома МИСиС по адресу:

**Москва, Ленинский пр-т, 4**, главный корпус МИСиС, цокольный этаж; тел.: **(495) 638-44-12**.

Для приобретения издания по безналичному расчету необходимо предварительно оформить заказ по электронной почте: [alek-drovna@yandex.ru](mailto:alek-drovna@yandex.ru) (справки по тел.: **(495) 638-44-28**).