УДК 669.017:621.73

С.С. Дьяченко, д-р техн. наук, проф., **И.В. Пономаренко,** канд. техн. наук
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина
Тел.: +38 (057) 7073666; *E-mail:* ss_djachenko@mail.ru

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Рассмотрено влияние ионной бомбардировки титаном на топографические особенности предварительно шлифованных и полированных стальных изделий. Установлено, что такая обработка значительно изменяет все исследуемые параметры шероховатости: для полированных изделий они увеличиваются, для шлифованных – существенно снижаются, обеспечивая уменьшение концентраторов напряжений и повышая механические характеристики изделий.
Ключевые слова: *топография поверхности, полирование, шлифование, ионная бомбардировка.*

1. Введение

В современных конструкциях в связи с их усложнением, жесткостью режимов эксплуатации, интенсификацией работы особенно важной становиться проблема обеспечения надежности. Ее решение требует совершенствования и разработки принципиально новых технологических процессов. При этом финишные методы обработки, формирующие физико-химическое состояние поверхностного слоя деталей, играют решающую роль, поскольку большинство деструктивных процессов (начальные этапы разрушения при разных видах объемной деформации, образование усталостных трещин, коррозия, износ) начинаются именно с поверхности [1–3]. Улучшая ее качество, можно существенно повысить надежность изделий.

Под качеством поверхностного слоя принято понимать три группы параметров: микрогеометрические (шероховатость, субшероховатость), макрогеометрические (волнистость), физико-механические (твердость, модуль Юнга, структура, фазовый и химический состав, плотность дислокаций и др. [2, 3].

Анализ профиля поверхности и оценку ее параметров выполняют, главным образом, осуществляя двухмерные измерения. Однако поскольку топология поверхности трехмерна, любая двухмерная оценка дает неполное ее описание. Последнее время в инженерной механике для оценки эксплуатационных свойств деталей машин все шире используется трехмерный анализ шероховатости поверхности [4]. Применение результатов трехмерных измерений шероховатости для описания геометрических моделей реальной поверхности может быть эффективно в численных расчетных программах MATLAB, ANSYS и т.д.

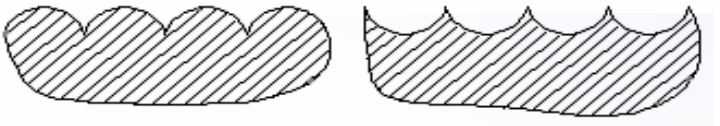
Наибольшее распространение для измерения трехмерные характеристик поверхности получили щуповые измерительные системы, являющиеся контактными по своей сути и ставшие логическим развитием двухмерного профилометрирования, а также атомносиловые микроскопы (АСМ). Щуповые системы для трехмерного измерения подобны двухмерным, поэтому наследуют практически все их недостатки: значительные размеры щупа, большой радиус при вершине (~5–10 мкм), проскальзывание при испытании, существенные нагрузки на поверхность, низкая разрешающая способность в вертикальном направлении (~ 0,1 мкм) [4, 5]. Указанных недостатков лишены скани-

рующие зондовые микроскопы, работающие в режиме АСМ и в большинстве случаев позволяющие проводить бесконтактный анализ поверхности. Разрешающая способность последних по вертикальной оси составляет сотые, а в некоторых случаях тысячные доли нанометра [4, 6, 7].

Трехмерное профилометрирование позволяет более точно оценить реальные характеристики поверхности: однозначно дифференцировать впадины, образованные единичными лунками или бороздками (в двухмерных измерениях их идентифицировать не удается); определить значения экстремальных характеристик шероховатости, поскольку при традиционном способе их измерения профиль проходит по склонам вершин и впадин, а не пересекается с ними, что искажает опорную кривую поверхности; повысить информативность результатов в связи с увеличением определяемых независимых параметров; визуализировать поверхность при помощи компьютера, т.е. детально представить ее топографию; получить ряд новых параметров, таких как материальный объем или площадь контакта [4].

Существенное развитие инструментальной базы для определения топографии поверхности опережает нормативно-законодательную. Несмотря на то, что последние два десятилетия фирмами-разработчиками оборудования активно ведутся работы по созданию стандартов измерения шероховатости поверхности на основе ее трехмерного анализа, на сегодняшний день они практически отсутствуют. Так, только сейчас странами-членами ЕЭС принят ряд рекомендаций по терминологии и оценке параметров шероховатости на основе трехмерного анализа. Все существующие национальные стандарты основаны на двумерной оценке [4].

В настоящее время известно более 30 различных микрогеометрических параметров, количественно оценивающих топографию поверхности. Ряд из них, например *Ra*, общепринят и входит в большинство международных и национальных стандартов (например, ДСТУ 2409–94, ГОСТ 2789–73, ISO 4287:1997 и др.). Однако ряд значимых параметров шероховатости, характеризующих форму неровностей профиля, например асимметрия и эксцесс высотного распределения профиля, в украинском стандарте отсутствует. Важность параметров, которые дают представление о форме неровностей профиля, можно продемонстрировать рисунком 1. Приведено два профиля поверхностей, имеющие различную форму микронеровностей, но равные высотные параметры. Такие поверхности будут иметь сильно отличающиеся эксплуатационные свойства.



а б

Рис. 1. Профили поверхностей, имеющие различную форму микронеровностей, но равные высотные параметры: а – впадины микрорельєфа с малым радиусом закругления дна; б – впадины с закругленной формой дна

Целью данной работы является анализ топографии поверхности стальных изделий после различных технологических воздействий, полученной при двух- и трехмерных измерениях. Цель исследования может быть достигнута при решении следующих задач: определении микрогеометрических характеристик качества поверхности с помощью щупового профилографа-профилометра и АСМ; анализ и сопоставление полученных данных двух- и трехмерных методов измерений.

2. Основное содержание и результаты работы

В предыдущих наших исследованиях было показано, что можно очень существенно повысить комплекс механических характеристик изделия не путем изменения свойств материала по всему сечению, а только воздействуя на тонкий (несколько микрометров) поверхностный слой, обеспечивая повышение его качества [8–13]. Очень эффективным методом является ионно-плазменная обработка (ИПО) низкоэнергетическими ионами (1–3 кэВ). При этом решающую роль играет первая стадия ИПО – ионная бомбардировка (ИБ), повышающая $\sigma_{0,2}$ стальных деталей без концентраторов напряжений на 34 %, с концентраторами – на 84 %. Последующее нанесение покрытия увеличивает прочность не более чем на 5 %. Важно подчеркнуть, что, несмотря на столь большое упрочнение, пластичность не снижается. Такое повышение прочности без охрупчивания изделия не было достигнуто ни одним из известных объемных методов обработки. Поскольку полученный эффект связан именно с поверхностным слоем, в работе проанализированы и сопоставлены характеристики микрогеометрии поверхности, полученные двух- и трехмерными методами измерений – щуповым профилографом-профилометром и АСМ.

Исследования выполнены на стали 18ХГТ. Образцы в форме цилиндрических дисков (диметр 12 мм; высота 8 мм) предварительно подвергали закалке от 880±10 °С (выдержка 0,5 ч) с высоким отпуском (500 °С, 1,5 ч). Торцевую плоскость образцов после термообработки шлифовали, полировали алмазными пастами, подвергали ИПО на установке «ННВ-66-И1» по режимам, приведенных в [9, 10, 14]. ИБ осуществляли ионами титана в среде аргона, нанесение покрытия TiN – в азоте. Таким образом, сопоставлялись поверхности в состояниях после шлифования и полирования без ИПО, после ИБ без нанесения покрытия и после ИБ + покрытие TiN толщиной ~ 1 мкм.

Шероховатость и профиль поверхности (ДСТУ 2413–94) определяли контактным методом с помощью профилографа-профилометра TR–200 (радиус вершины алмазного щупа 5 мкм). Данные непосредственно передавались на ПК и систематизировались. Ошибка в измерении параметра *Ra* не превышала 10 %, диапазон измерений – 0,005-16 мкм.

Трехмерные топографические особенности поверхности исследовали с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) Solver P47H_PRO MDT (Нанотехнология-МДТ, Россия) в режиме АСМ. Разрешающая способность микроскопа по трем направлениям X, Y и Z соответственно равна 0,0004 нм, 0,0011 нм и 0,006 нм [15].

Применимость СЗМ в материаловедении, главным образом, ограничивается высокими требованиями к качеству исследуемых поверхностей (очень низкими значениями высотных параметров, исчисляющихся долями нанометров). Однако, поскольку ИПО обладает значительным потенциалом для использования в качестве окончательной операции большой гаммы машиностроительных деталей, нами были сопоставлены поверхности после наиболее типичных механических обработок – шлифования и полирования.

3. Результаты двухмерных измерений шероховатости и определения профиля поверхности изделий

Типичные профилограммы поверхностей рассмотренных образцов после различной обработки приведены на рис. 2, основные двухмерные характеристики – в табл. 1.

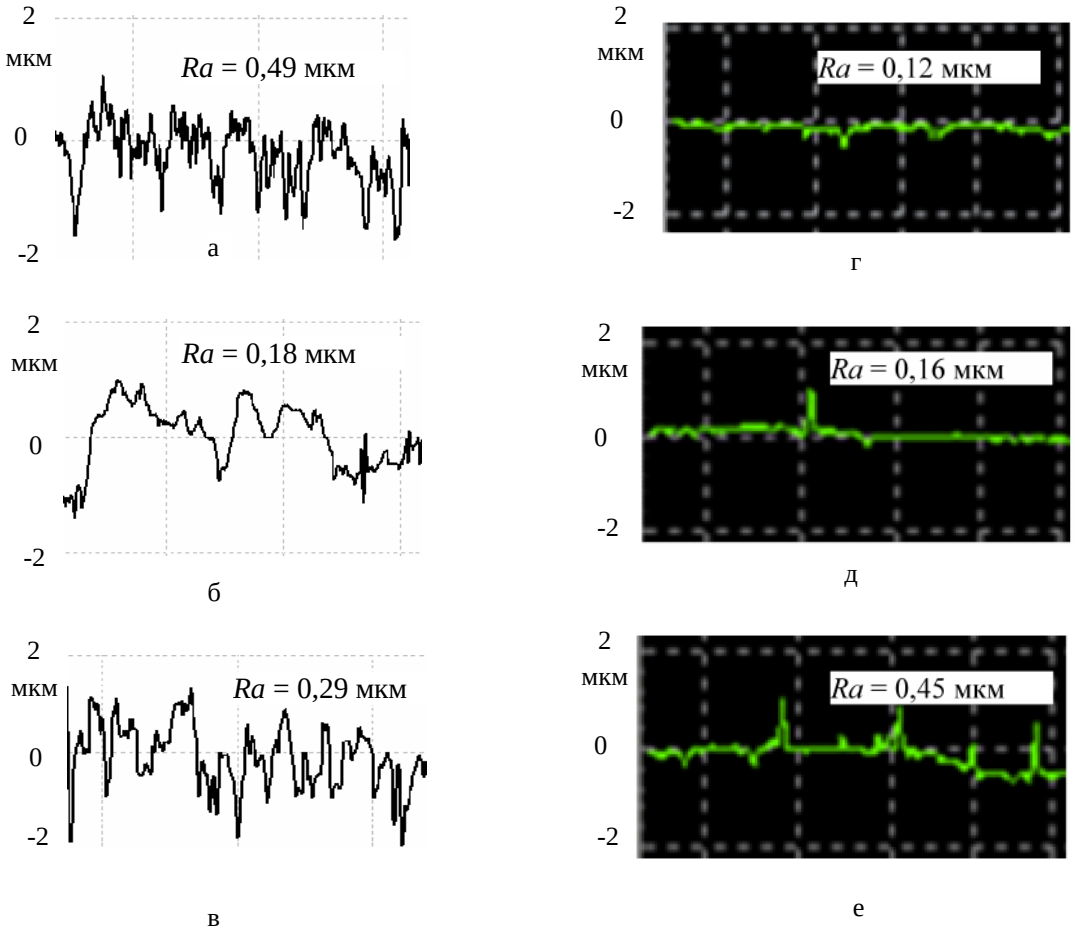


Рис. 2. Профилограммы поверхности после различной обработки:
а – шлифование (Ш); г – полирование (П); б – Ш + ИБ; д– П + ИБ; в – Ш + ИБ+ TiN; е – П + ИБ+ TiN

Таблица 1. Шероховатость поверхности для профиля после различной обработки (TR-200)

Шероховатость	Метод обработки					
	Ш	Ш+ИБ	Ш+ИБ+TiN	П	П+ИБ	П+ИБ+TiN
Ra, мкм	0,49	0,18	0,29	0,12	0,16	0,45

Анализ рис. 2 и табл. 1 показывает, что полирование существенно уменьшает шероховатость по сравнению со шлифованием. Поскольку речь идет о механическом полировании, то снижение шероховатости достигается преимущественно за счет срезания имеющихся после шлифования выступов, что приводит к образованию специфического профиля поверхности: относительно гладкого плато с достаточно глубокими впадинами (бороздами) – рис. 2 (а, г). ИБ по-разному влияет на шероховатость шлифованных и полированных образцов: для шлифованных она уменьшается (рис. 2, б), тогда как для полированных она возрастает (рис. 2, д). Кроме того, анализируя вид профилограмм после шлифования и шлифования с ИБ, можно обнаружить значительное сглаживание рельефа: уменьшения высот выступов, притупления остроты впадин (рис. 2, а, б). Иными словами, при ИБ происходит залечивание поверхностных дефектов за счет распыления поверхностного слоя. Это уменьшает число концентраторов напряжений, что, в соответ-

ствии с теорией Гриффитса, улучшает механические характеристики изделия. Увеличение шероховатости после ИБ для предварительно полированных образцов связано с появлением отдельных микрокапель титана, что вызвано отсутствием сепарации плазменного потока. Рост шероховатости полированной поверхности отмечался и ранее во многих работах, посвященных физическим методам поверхностной обработки [например, 16, 17].

Последующее нанесение покрытия TiN, независимо от исходной механической обработки, приводит к существенному повышению шероховатости за счет большого количества микрокапель α–Ti (рис. 2, табл. 1), причем для предварительно полированных поверхностей этот рост выражен ярче, чем для шлифованных. На относительно гладкой полированной поверхности эти капли создают значительные пики, резко увеличивая шероховатость, а на сложной («холмистой») шлифованной поверхности они заполняют впадины, скатываясь еще в жидком виде по склонам выступов и сглаживая рельеф. Следует отметить, что шероховатость, формирующаяся при нанесении покрытия, оказывается ниже, чем исходная для шлифованной поверхности и существенно выше для полированной. Таким образом, ИПО повышает микрогеометрические характеристики качества шлифованных поверхностей.

Как было показано выше, высотные характеристики шероховатости поверхности изделий не всегда являются определяющими их поведение в эксплуатации. Поэтому в данной работе также определяли относительную опорную длину профиля t_p для разных поверхностей по их относительным опорным кривым профилей – кривым Аббота (рис. 3).

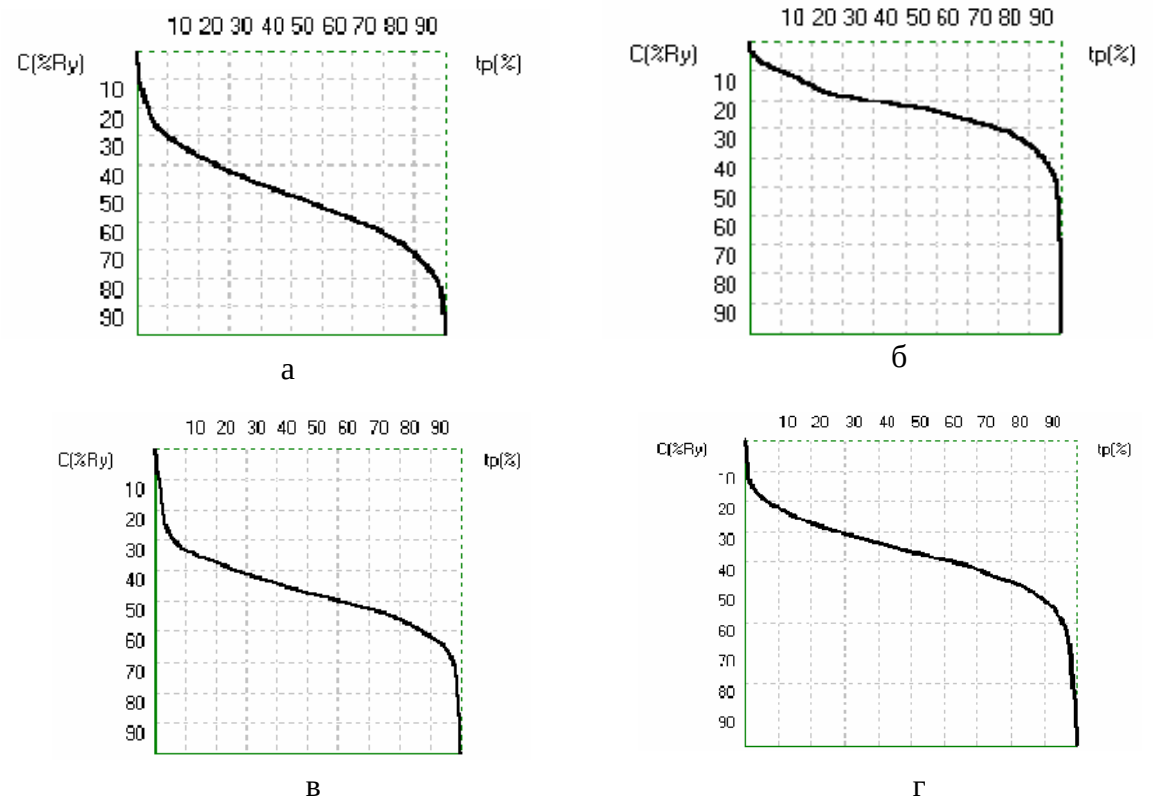


Рис. 3. Относительные опорные кривые профилей поверхности (кривые Аббота): а – Ш , б – П; в – Ш + ИБ; г – Ш + ИБ + TiN

Из рисунка видно, что t_{50} (t_p на уровне профиля 50 %) для шлифованной поверхности составляет 48 %, ИБ увеличивает этот показатель до 60 %, а нанесение покрытия – до 85 %. Высокие значения t_p при прочих равных условиях обычно свидетельствуют о лучших трибологических свойствах таких поверхностей, особенно в период их приработки.

4. Результаты трехмерных измерений шероховатости и исследования топографии поверхности изделий

Топография поверхности образцов после различных методов обработки приведена на рис. 4, а соответствующие значения трехмерных параметров шероховатости – в табл. 2.

Поскольку ИБ по сути является вакуумным травлением, для сопоставления была исследована топография полированной поверхности и после химического травления. Ионное травление осуществлялось с разной длительностью: режим I – 2 мин, режим II – 4 мин.

Как и следовало ожидать, после шлифования видны глубокие грубые борозды. После полирования они тоньше, а химическое травление практически полностью их удаляет (остаются только самые глубокие). Рельеф после ИБ зависит от длительности процесса – при обработке по режиму I (2 мин) наблюдается сглаживание бороздок, по режиму II (4 мин) он подобен образующемуся после химического травления. При нанесении покрытия на поверхности видны капли титана, о чем говорилось ранее.

Характеристики шероховатости поверхностей, полученные при трехмерных измерениях, в соответствии с ISO 4287:1997, обозначаются буквой S (от англ. *surface* – поверхность). По смыслу они аналогичны соответствующим параметрам, определяемым по профилю поверхности: *Sy* – размах высот (аналог *Rmax*), *Sz* – десять точек по высоте (аналог *Rz*), *Sa* – средняя арифметическая шероховатость (аналог *Ra*), *Sq* – средняя квадратическая шероховатость (аналог *Rq*), *Ssk* – асимметрия высотного распределения профиля, *Sku* – эксцесс высотного распределения профиля. Аналогов для последних двух безразмерных параметров в украинском стандарте (ДСТУ 2409–94) не существует, однако они очень важны для описания топографии сложных поверхностей.

Таблица 2. Шероховатость поверхности для участка поверхности после различной обработки (Solver P47H_PRO, MDT); сталь 18ХГТ

Обработка	Параметр шероховатости					
	Sy, нм	*Sz*, нм	*Sa*, нм	*Sq*, нм	*Ssk*	*Sku*
Шлифование	530	261	43	54	-0,27	0,61
Полирование	144	73	15	18	-0,21	-0,11
Полирование+травление (химическое)	354	175	21	27	0,99	2,45
Полирование+ИБ (режим I)	249	124	21	29	-0,82	1,85
Полирование+ИБ (режим II)	1505	756	71	123	2,34	16,5
Полирование +ИБ (режим II)+TiN	2488	1261	74	132	1,66	10,8

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы. По сравнению с полированием параметр *Sy* возрастает после шлифования в ~ 3,7 раза, после ИБ (режим I) – в 1,9 раза, после ИБ (режим II) – больше, чем в 10 раз, для химически травленной поверхности – в 2,5 раза. Характеристика *Sz* для указанных поверхностей изменяется аналогично *Sy*. Усредненный параметр шероховатости *Sa* меняется подобным образом, однако количественно существенно отличается. Так, шлифованная поверхность имеет значение *Sa* в 3 раза больше, чем полированная, ИБ (режим I) – в 1,5 раза, ИБ (режим II) – в 4,9 раза, покрытие TiN – в 5 раз, химическое травление – в 1,4 раза.

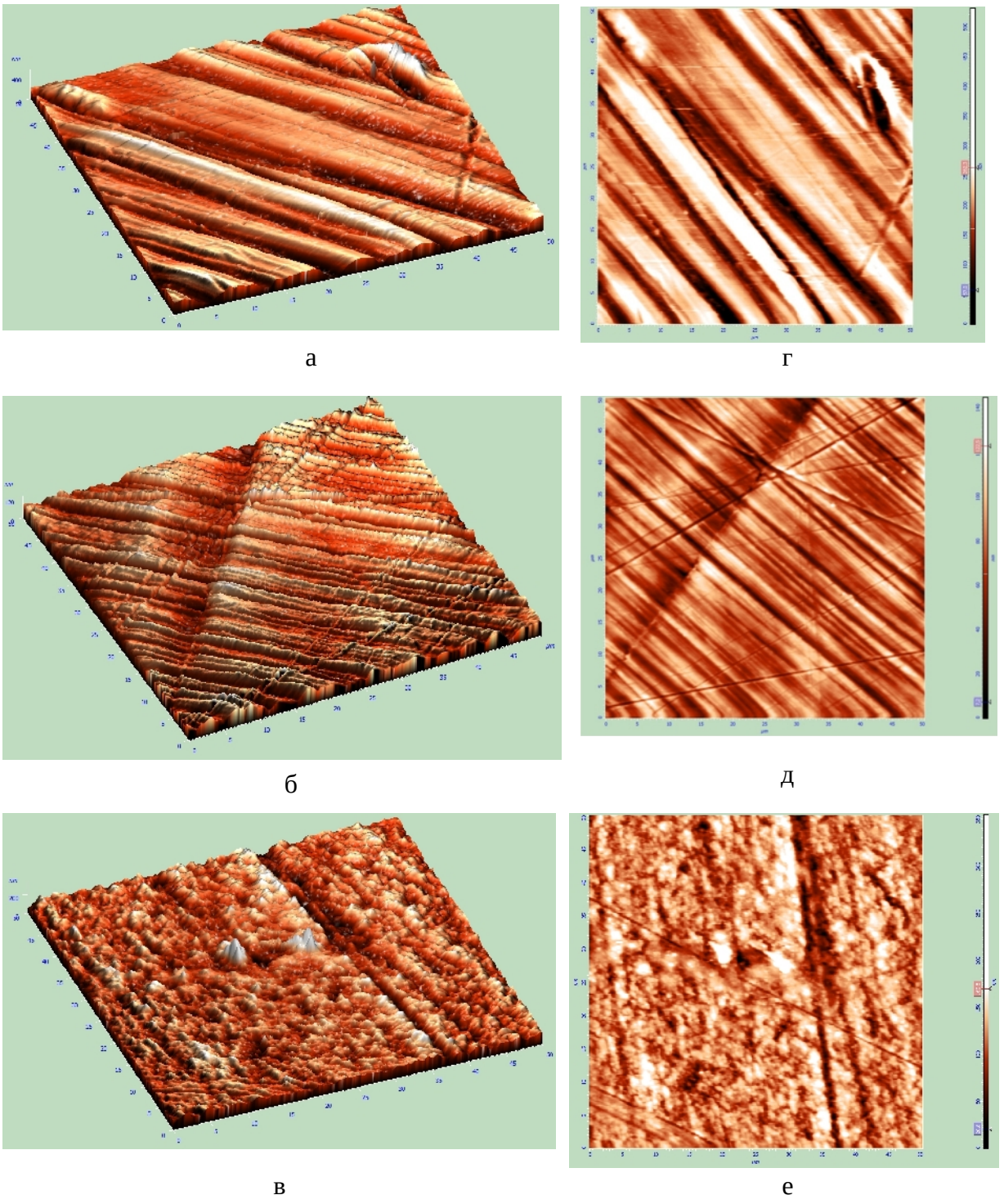


Рис. 4. Топография поверхности образцов после различной обработки: а, г – Ш; б, д – П; в, е – П + травление; а–в – визуализация поверхности (3D), г–е – визуализация поверхности (2D)

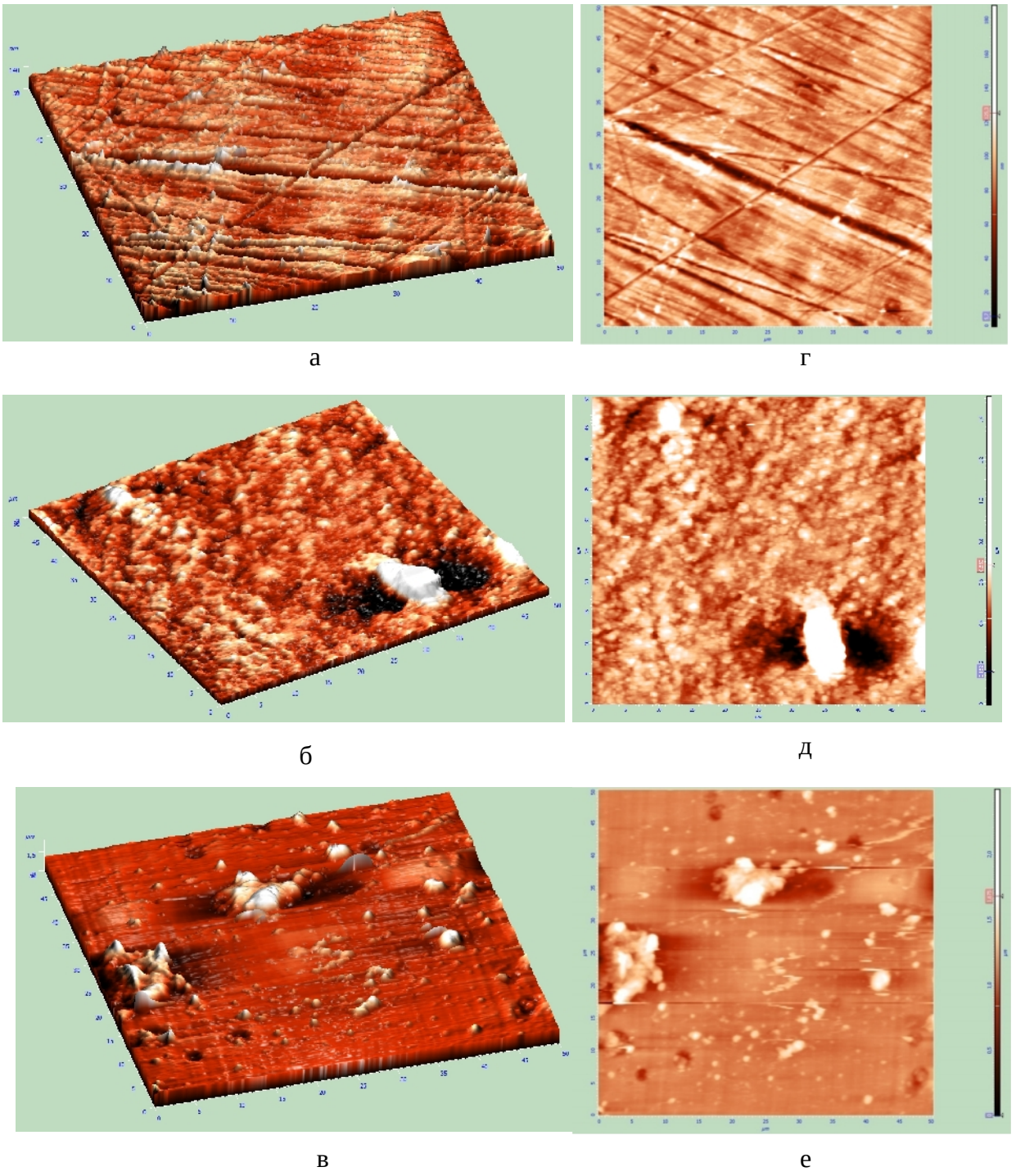


Рис. 5. Топография поверхности образцов после различной обработки:
а, г – П + ИБ (режим I); б, д – П + ИБ (режим II); в, е – П + ИБ (режим II) + TiN; а–в – визуализация поверхности (3D), г–е – визуализация поверхности (2D)

Параметр *Sq*, являясь более чувствительным к экстремальным значениям неровностей, чем *Sa*, позволил выделить поверхности после ИБ (режим II) и с покрытием TiN, наличием резких отдельных неровностей, что видно на рис. 5, б, д и в, е. Кроме того, на них присутствуют так называемые «артефакты», в виде отдельных сбоев прохода зонда

над поверхностью и локальных ее загрязнений. Параметр *Sq* для большинства поверхностей, полученных механической обработкой, больше в 1,25 раза *Sa*. Это справедливо для шлифованных, полированных и травленных поверхностей (табл. 2), но при переходе к поверхностям после ИБ, это коэффициент возрастает до 1,8.

Значение параметра *Ssk* для Гауссовых поверхностей, какими является большинство традиционных технологических поверхностей, близко к нулю, а сама величина описывает форму функции распределения вероятности того, что профиль соответствует заданной высоте Z. В профилях с положительным коэффициентом асимметрии доминируют микронеровности с четкими высокими пиками, которые выделяются из среднего. Отрицательные значения *Ssk* присущи поверхностям с четкими глубокими впадинами и гладкими плато. Значения $|Ssk| \geq 1{,}5$ указывают на то, что поверхность имеет сложную форму и простые параметры, такие как *Sa*, *Sq* и др., не могут адекватно характеризовать качество поверхности. В нашем случае минимальное по модулю значение $Ssk = 0{,}1$ соответствует химически травленой поверхности; для шлифованных и полированных образцов значения *Ssk* не более 0,3 (при этом отрицательны). Даже небольшое время бомбардировки (2 мин) приводит к увеличению *Ssk* до – 0,8. Более длительное время ионной очистки, а также нанесение покрытия TiN увеличивает данную характеристику до 2,3 и 1,7 соответственно.

Другой важной характеристикой шероховатости поверхности является *Sku*, выступающей мерой вершинности распределения высоты на поверхности. Для Гауссовой поверхности $Sku = 3$; поверхности с $Sku < 3$ имеют узкий и высокий пик функции распределения неровностей, а при $Sku > 3$ – широкий и низкий. Анализируя результаты табл. 2, к Гауссовой поверхности по критерию $Sku = 3$, можно отнести поверхность после химического травления: для нее $Sku = 2{,}5$. Ионная бомбардировка вначале приближает полированную поверхность к Гауссовой, но после 4 мин обработки существенно ее искажает (табл. 2). Комбинацией асимметрии и эксцесса можно идентифицировать поверхности, которые имеют относительно единообразные высшие и глубокие точки экстремума.

Сопоставляя значения параметров шероховатости поверхности, определяемых при двух- и трехмерных измерениях, можно отметить их общий характер изменения при переходе от одной обработки к другой. Для одинаковых поверхностей в количественном отношении они существенно отличаются. Это связано с тем обстоятельством, что при трехмерном анализе топографии поверхности резко возрастает локальность исследования (в нашем случае изучаемая область составила 50х50 мкм), обеспечивая получение высотных параметров, отличающихся на порядок в сравнении с их двухмерными аналогами. Аналогичный вывод был сделан в работе [10].

Учитывая высокую точность, скорость и наглядность методов трехмерного измерения необходимо шире их применять для определения качественных характеристик поверхностей, которые в значительной степени обеспечивают высокие эксплуатационные свойства изделий, например, поверхностей после ИПО.

5. Заключение

На основании изложенного материала можно сделать ряд выводов.

1. Качественные значения параметров шероховатости, определяемых разными методами, аналогичны, количественные же отличаются на порядок. Последний факт связан с уровнем локальности участка исследования: в первом случае базовая длина профиля составляла 0,25–0,8 мм, а во втором – площадь поверхности 50х50 мкм.

2. ИБ по-разному влияет на шероховатость шлифованных и полированных образцов: для первых она уменьшается, тогда как для последних она возрастает. Снижение шероховатости шлифованных образцов после ИБ вызвано преимущественным распылением металла на выступах исходного профиля и заполнением впадин микрокаплями

α–Ti. Резкое же увеличение шероховатости после ИБ полированных образцов объясняется наличием микрокапель Ti на относительно гладкой поверхности.

3. Покрытие TiN приводит к заметному снижению шероховатости шлифованных поверхностей и к существенному повышению для полированных, что позволяет ИПО (все этапы) рекомендовать не только для увеличения конструктивной прочности шлифованных изделий, но и для улучшения микрогеометрических характеристик их поверхностей.

4. Параметр асимметрии *Ssk* для большинства рассмотренных поверхностей значительно отличается от 3 (Гауссова поверхность), что свидетельствует о сложности рельефа, формирующегося после различных стадий ИПО и недостаточности параметров *Ra, Sy, Sz, Sa,* и *Sq* для его адекватного описания.

5. Применение трехмерных методов измерения шероховатости поверхности позволяет более точно определить ее параметры, получить объективную информацию об особенностях ее рельефа, а также обеспечить ее визуализацию.

Список литературы:

1. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В.П. Алехин. – М.: Наука, 1983. – 280 с.

2. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов / Базров Б.М. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.

2. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов: материалы семинара. – М.: МДНТП, 1980. – С. 3–13.

3. Дьяченко С.С. Влияние нанокристаллических покрытий на свойства изделий из конструкционных сталей / Дьяченко С.С., Пономаренко И.В., Дощечкина И.В. // Международная конференция «Современное материаловедение: достижения и проблемы». MMS-2005. Тезисы докладов. 26-30 сентября 2005 г., Киев, Украина, с. 665-666.

4. Влияние различных методов поверхностного упрочнения на усталостную прочность / [И.В. Пономаренко, С.С. Дьяченко, И.В. Дощечкина, И.И. Кондратенко] // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2006. – Вып. 33. – С. 41-44.

5. Дяченко С.С. Новий аспект використання іонно-плазмової обробки / С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко // Металознавство та обробка металів – 2009. – №3. – С. 53–56.

6. Пономаренко И.В. Роль изменения твердости в повышении конструкционной прочности сталей после ионно-плазменной обработки / И.В. Пономаренко // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2010. – Вып. 51. – С. 139–142.

7. Дяченко С.С. Стан поверхні та розподіл титану в сталі 20Х після іонного бомбардування / [С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко, А.В. Кваша, С.Л. Абашин] // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2010. – Вып. 51. – С. 135–138.

8. Use of the ion-plasma treatment for improving the structural strength of items / [S.S. Dyachenko, I.V. Doshchechkina, I.V. Ponomarenko, I.S. Tatarkina] // Journal of nano- and electronic physics. – Sumy: Sumy State University, 2012. – Vol. 4, № 1. – P. 01020 (1 – 4).

9. Повышение механических свойств деталей с концентраторами напряжений путем образования поверхностного нанослоя / С.С. Дьяченко, И.В. Пономаренко, И.В. Дощечкина [и др.] // Вісник кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського. – 2011. – № 1. – С. 56–58.

10. Порошин В.В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: монография / В.В. Порошин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 196 с.

11. Карташов А.И. Шероховатость поверхности и методы ее измерения / А.И. Карташов. – М.: Изд-во стандартов, 1967. – 160 с.

12. Арутюнов П.А. Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии / Арутюнов П.А., Толстихина А.Л., Демидов В.Н. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Раздел: «Исследование структуры и свойств». – М., 1998. – Т. 65, №9. – С. 27–37.

13. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учебн. пособ. для студ. старш. курсов высш. учебн. зав-ий / В.Л. Миронов. – Нижний Новгород: РАН Ин-т физики микроструктур, 2004. – 114 с.

14. Патент України на корисну модель 55911, МПК С 2104. Спосіб підвищення конструктивної міцності сталевих виробів / Пономаренко І.В., Д'яченко С.С., Подригало М.А., Лобанов В.К., Пашкова Г.І.; Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № u201008421; заявл. 05.07.10; опубл. 27.12.10, Бюл. № 24.

15. СОЛВЕР Р47-PRO. Исследовательский сканирующий зондовый микроскоп платформы СОЛВЕР… [Электронный ресурс]: инструменты нанотехнологий [2008-2013]. URL:http://www.rusnanonet.ru/equipment/ntmdt_solver_p47pro/#title (дата обращения: 05.02.2014).

16. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / [Внуков Ю.Н., Марков А.А., Лаврова Л.В., Бердышев Н.Ю.]. – К.: Тэхника, 1992. – 143 с.

17. Некоторые особенности синтеза структуры процессов комбинированной отделочной обработки осевых лезвийных инструментов с ионно-плазменными покрытиями / А.Х. Маджид, А.Н. Михайлов, Е.А. Михайлова [и др.] // Прогресивні технології та системи машинобудування. – 2009. – № 37. – С. 121–135.

Надійшла до редакції 15.02.2014

С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко

ТОПОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ПІСЛЯ РІЗНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ

Розглянуто вплив іонного бомбардування титаном на топографічні особливості попередньо шліфованих і полірованих сталевих виробів. Встановлено, що така обробка значно змінює всі досліджувані параметри шорсткості: для полірованих виробів вони збільшується, для шліфованих істотно знижуються, забезпечуючи зменшення концентраторів напружень і підвищення механічних характеристик виробів.

Ключеві слова: *топографія поверхні, полірування, шліфування, іонне бомбардування.*

S.S. Dyachenko, I.V. Ponomarenko

TOPOGRAPHIC SURFACE FEATURES OF STEEL ARTICLES AFTER DIFFERENT PROCESSING METHODS

The effect of ion bombardment by titanium on topography features of pre-polished and grinded steel articles was investigated. It has been established that such treatment significantly changes all investigated parameters of roughness: for polished articles they increase, for grinded ones – significantly decrease. This provides the reduction of stress concentrators and improves the articles mechanical characteristics.

Key words: *surface topography, polishing, grinding, ion bombardment.*