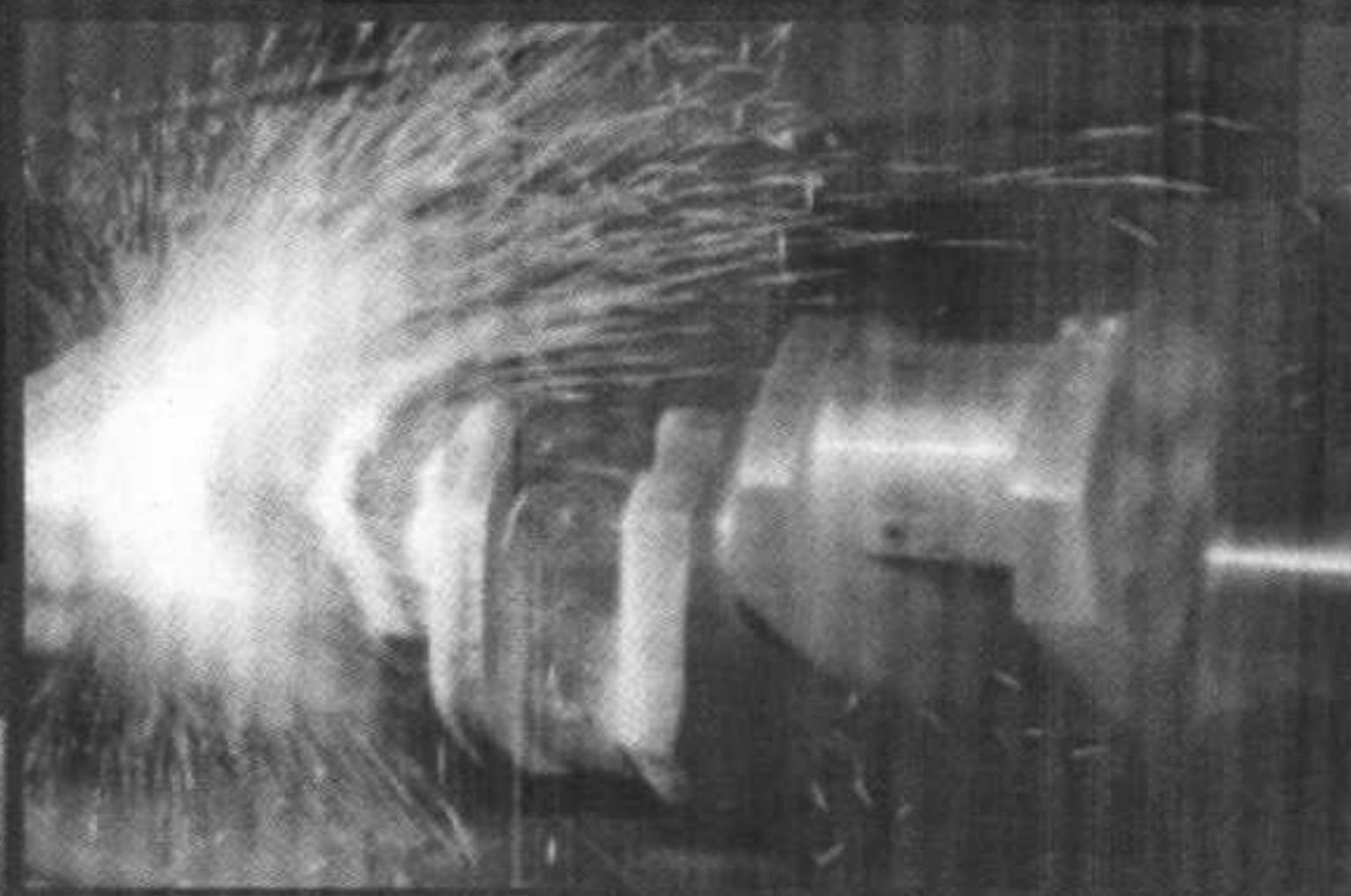
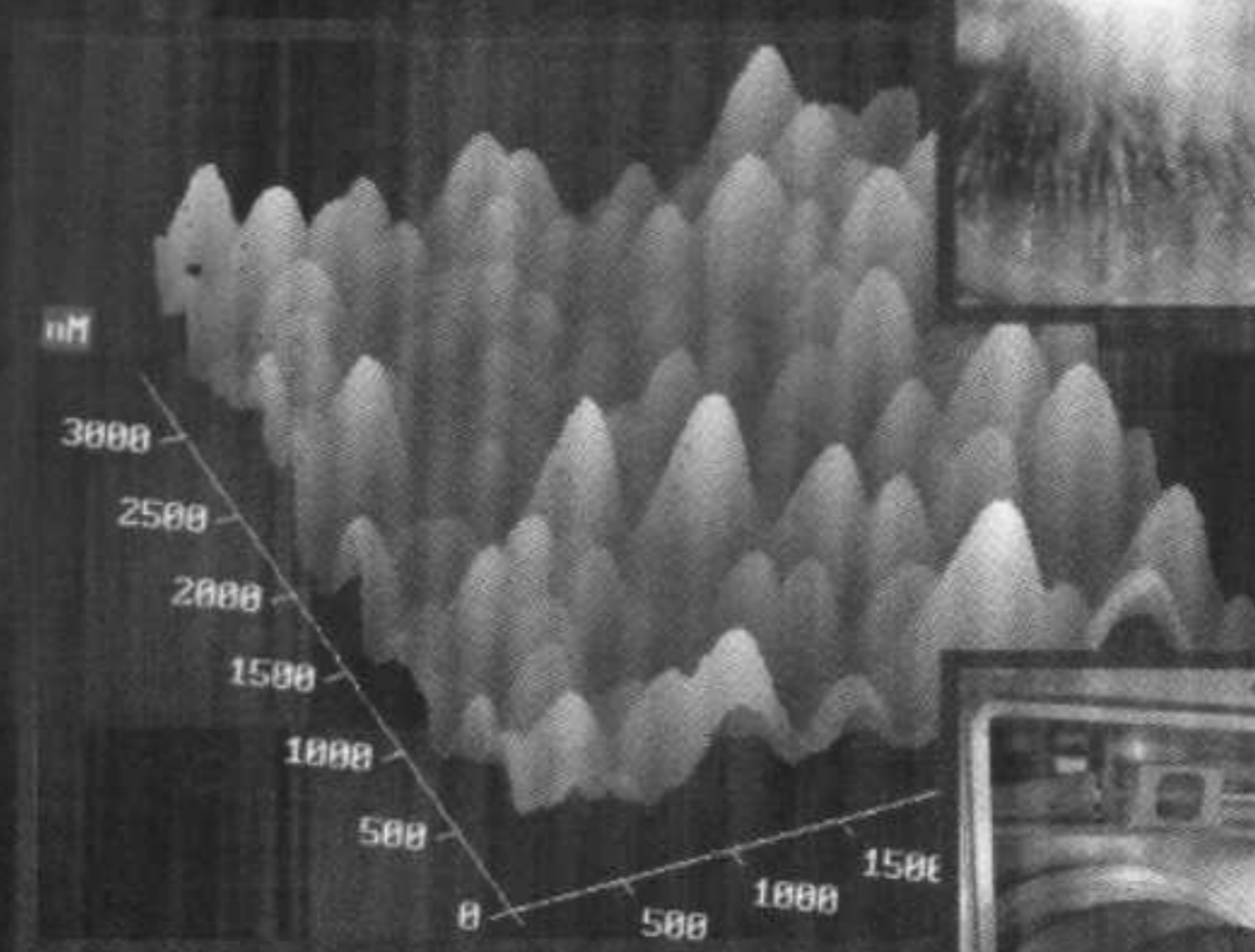


УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

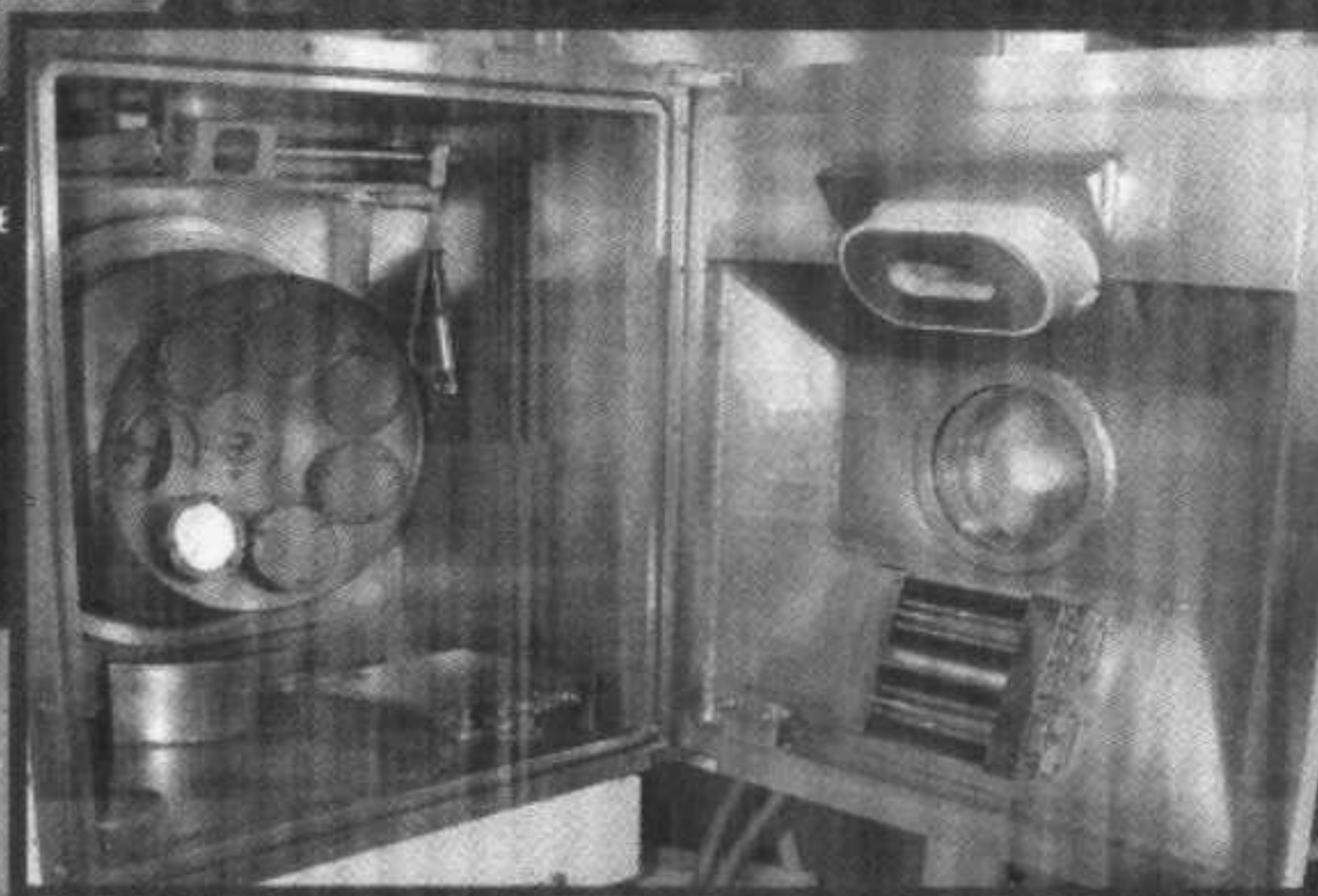
МЕХАНИЧЕСКАЯ
УПРОЧНЯЮЩАЯ
ОБРАБОТКА



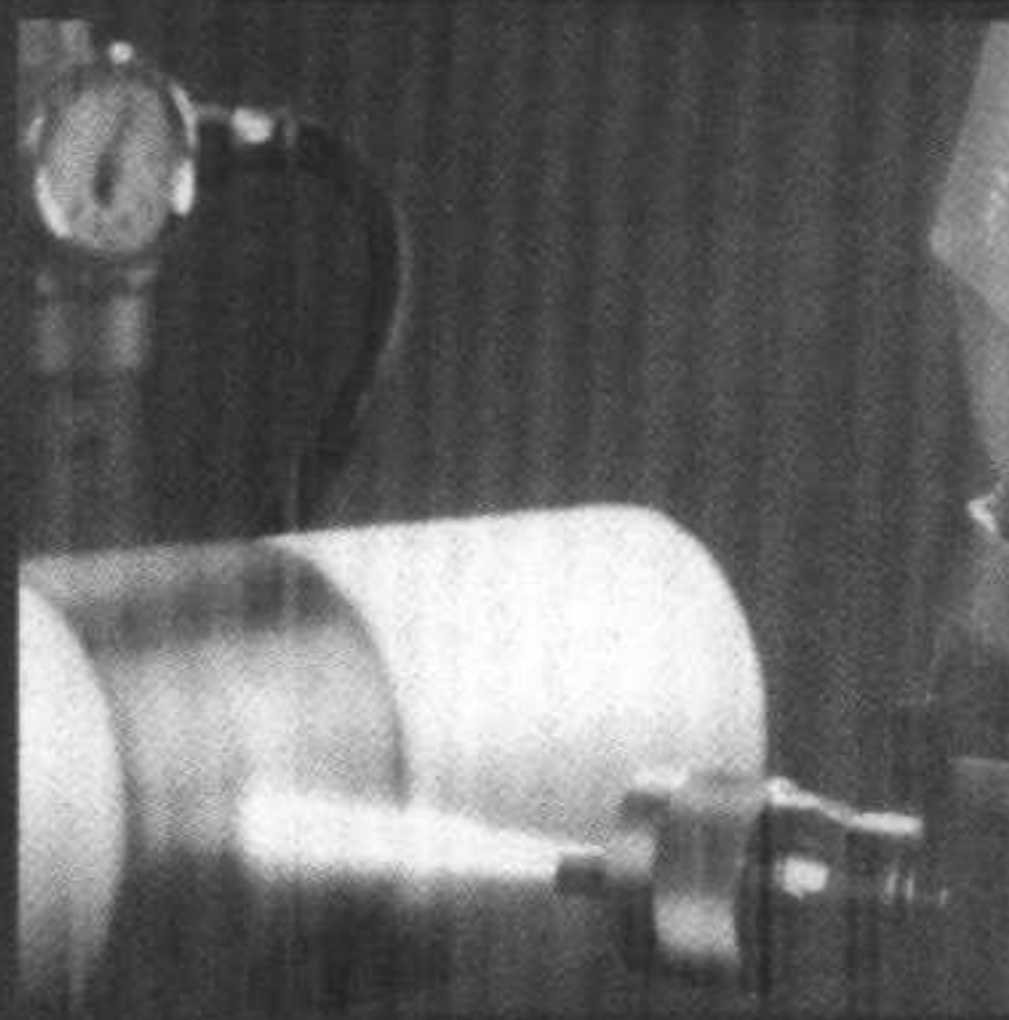
ТЕРМИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА



МЕТОДЫ
НАНЕСЕНИЯ
ПОКРЫТИЙ

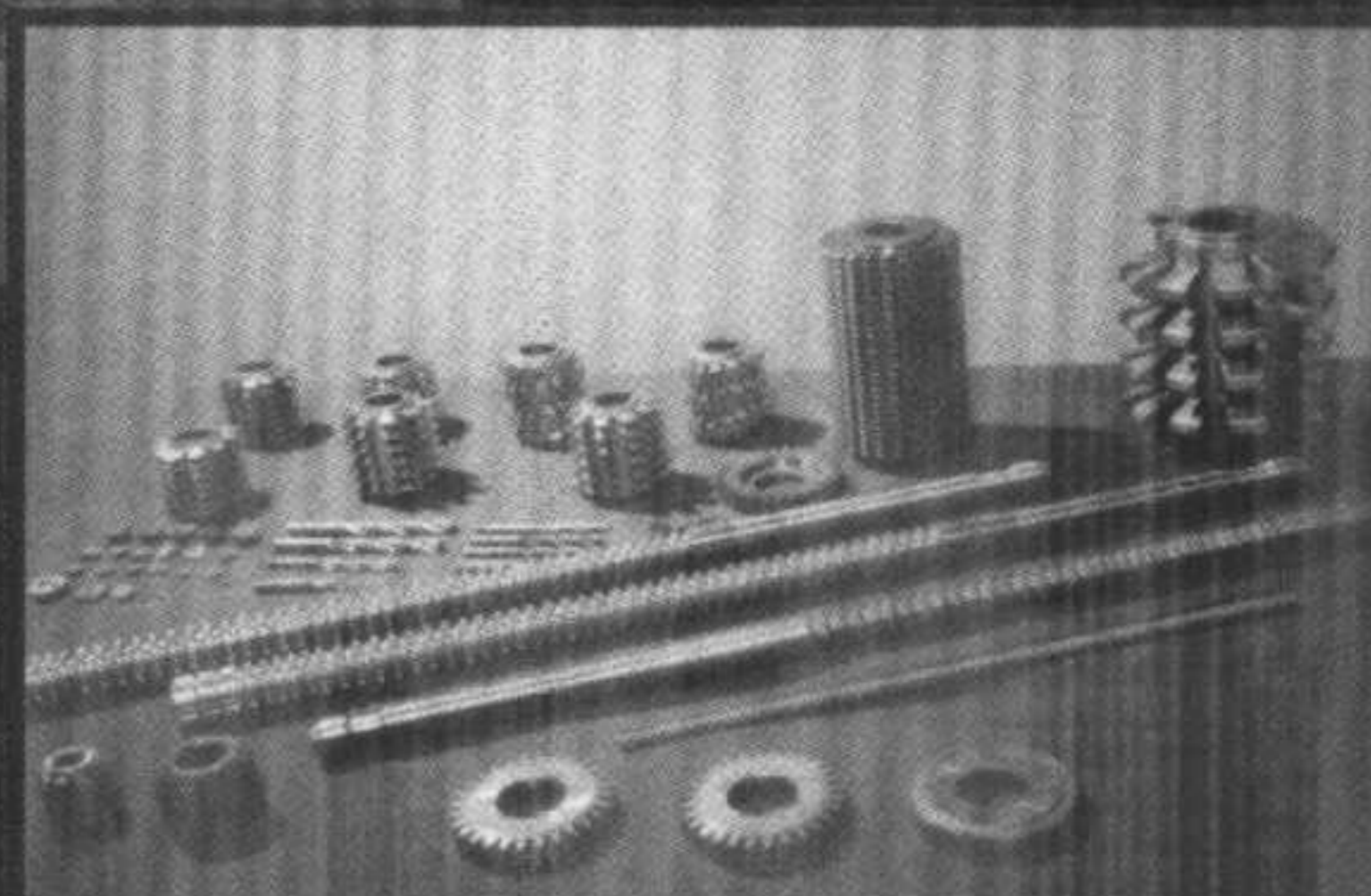


КОМБИНИРОВАННАЯ
ОБРАБОТКА



ПЕРСПЕКТИВНОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ

КОНТРОЛЬ
КАЧЕСТВА
УПРОЧНЕНИЯ



8₍₁₀₄₎ / 2013

Editor-in-Chief
Dr of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council
Dr of Eng. Sci., The honoured
worker of a science and
technics of the RF
V.F. BEZYAZYCHNYI

Editorial Assistants
Dr of Phys. Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:
Dr of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK
Dr of Eng. Sci.
O.V. CHUDINA

Editorial Council:
Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
V.A. SHULOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
L.P. SHESTOPALOVA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription,
which can be issued in any post office
(index on the catalogues: "Rospechat"
85159, "Pressa Rossii" 39269, "Pochta
Rossii" 60252) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 269-66-00,
268-40-77. Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

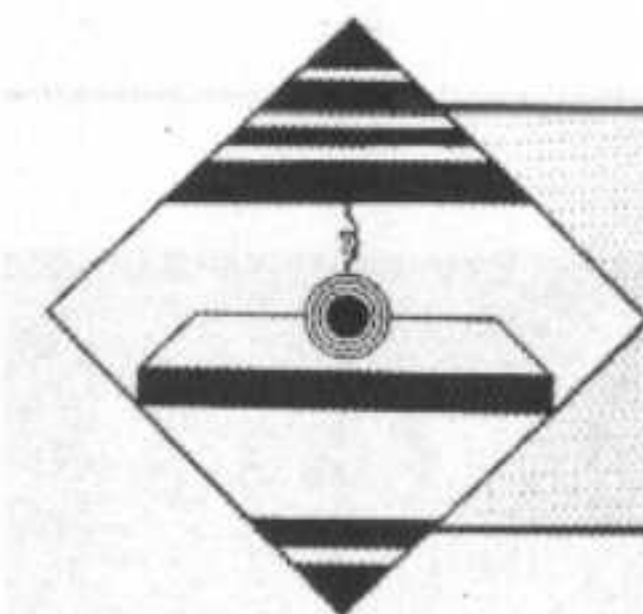
Journal is registered by RF Ministry
Tele- and Broadcasting of Mass
Communications Media. The certificate
of registration ПИ № 77-17733,
March 9, 2004

CONTENTS

➔	MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING	
	Zubkov N.N., Vasiliev S.G. Wear resistance improvement based on deformational cutting	3
➔	PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY	
	Afanasieva L.E., Barabonova I.A., Botyanov E.V., Ratkevich G.V., Grechishkin R.M. Structural phase transitions in high-speed steel at laser surface melting treatment with multichannel CO ₂ laser	10
	Babenko E.G., Nikolenko S.V., Kuzmichev E.N. The combined processing of St3 steel by the electrospark alloying and gaselectric surfacing in the environment of CO ₂	14
	Marants A.V., Sova A.A., Narva V.K., Smurov I.Yu. Deposition of cold spray coatings with laser post-treatment	21
	Fyodorov M.V., Zaydes S.A., Nezhivlyak A.E. Analysis of the effect of plasma-reinforced edges for locomotives' wheelsets on operational durability in the wheel-rail system	28
	Fedotov A.F., Amosov A.P., Ermoshkin A.A., Lavro V.N., Altukhov S.I., Latukhin E.I., Davydov D.M. Composition, structure and properties of multicomponent SHS-pressed cathodes of Ti-C-Al system and arc-PVD coatings made from them	33
➔	PROCESSING BY COMBINED METHODS	
	Kadyrmetov A.M., Sukhochev G.A., Maltsev A.F. Modeling of coating quality produced by plasma spraying with simultaneous electromechanical treating	39
➔	INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE	
	Pudov V.I., Dragoshansky Yu.N. Promising applications of amorphous-crystalline coatings for soft magnetic alloys	44

Reprint is possible only with the reference to the journal
"Strengthening technologies and coatings".

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses



УДК 621.78, 621.7.04, 62-722.2

Н.Н. Зубков, С.Г. Васильев (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)
E-mail: zoubkovn@bmstu.ru

Повышение износостойкости деталей пар трения скольжения на основе метода деформирующего резания

Представлена систематизация выполненных ранее исследований, предлагаются новые решения по применению метода деформирующего резания для повышения работоспособности деталей трения скольжения. Рассмотрены модификация поверхностных слоев деталей трения за счет глубокого деформационного упрочнения, создание подповерхностных микрополостей для удержания смазки, получение механической обработкой закалочных структур в поверхностном слое детали, химико-термическая обработка специальных макрорельефов, а также подготовка поверхностей под нанесение износостойких или антифрикционных покрытий.

Ключевые слова: износостойкость, трение, деформирующее резание, композиционные структуры, подшипники скольжения, твердые смазки, антифрикционный.

Article systematizes preceding research and offer new solutions for the use of deformational cutting method to improve performances of friction bearing units. Proposed modification of the surface bearing layers due to deep deformational hardening, creating subsurface microcavities for oil keeping, mechanical treatment with surface layers quenching, chemical and thermal treatment of special macroreliefs and preparation surfaces for wear-resistant and antifriction coatings.

Keywords: wear resistance, friction, deformational cutting, composite structures, friction bearing, solid lubricant, antifriction.

Главные тенденции машиностроения – повышение надежности, долговечности и точности работы машин и механизмов. Решающее значение имеет качество поверхностного слоя деталей, от которого напрямую зависит работоспособность деталей трения. Интенсификация эксплуатационных процессов, увеличение скоростей перемещения рабочих органов, повышение контактных нагрузок и температур увеличивает роль качества поверхностного слоя.

Совершенствование методов формирования заданных параметров поверхностного слоя возможно не только модернизацией существующих технологий, но и на основе разработки новых конструкторско-технологических решений. Новым подходом к модификации поверхности деталей узлов трения является применение перспективного метода механической обработки – *деформирующего резания* (ДР) как самостоятельного технологического приема, так и в сочетании с известными методами упрочняющей обработки. Метод деформирующего резания и инструмент для его реализации запатентованы в России, Украине, США и восьми странах Европы [1]. Метод и изделия, полученные на его основе, шесть раз удостоивались золотых медалей и дипломов международ-

ных выставок изобретений и инноваций. На выставке ИТЕХ-2010 целевые регулируемые фильтрующие трубы удостоены гран-при и кубка Азии за лучшее изобретение 2010 года.

При работе обычного токарного резца разрушение припуска происходит по линиям как главной, так и вспомогательной режущих кромок. Основное отличие инструмента для ДР состоит в том, что он имеет вспомогательную кромку, на которой исключен процесс резания. Стружка подрезается, деформируется, но не отделяется от заготовки полностью, формируя на ней развитый макрорельеф (рис. 1).

Лезвийная обработка методом деформирующего резания позволяет получать макрорельеф путем оребрения на таких материалах, как медь, алюминий и их сплавы, титан, стали, пластмассы. Характерные геометрические параметры оребрения составляют: шаг оребрения – 0,04...3,00 мм, высота ребер – до 7 шагов оребрения для цветных сплавов и до 5 шагов для сталей, ширина межреберного зазора – 0,01...1,00 мм, наклон ребер к основанию – до 45°. Помимо оребрения методом ДР возможно получать структуры в виде шипов, ячеек или резьбовых профилей. Стружка при обработке не образуется. Метод реализуется на

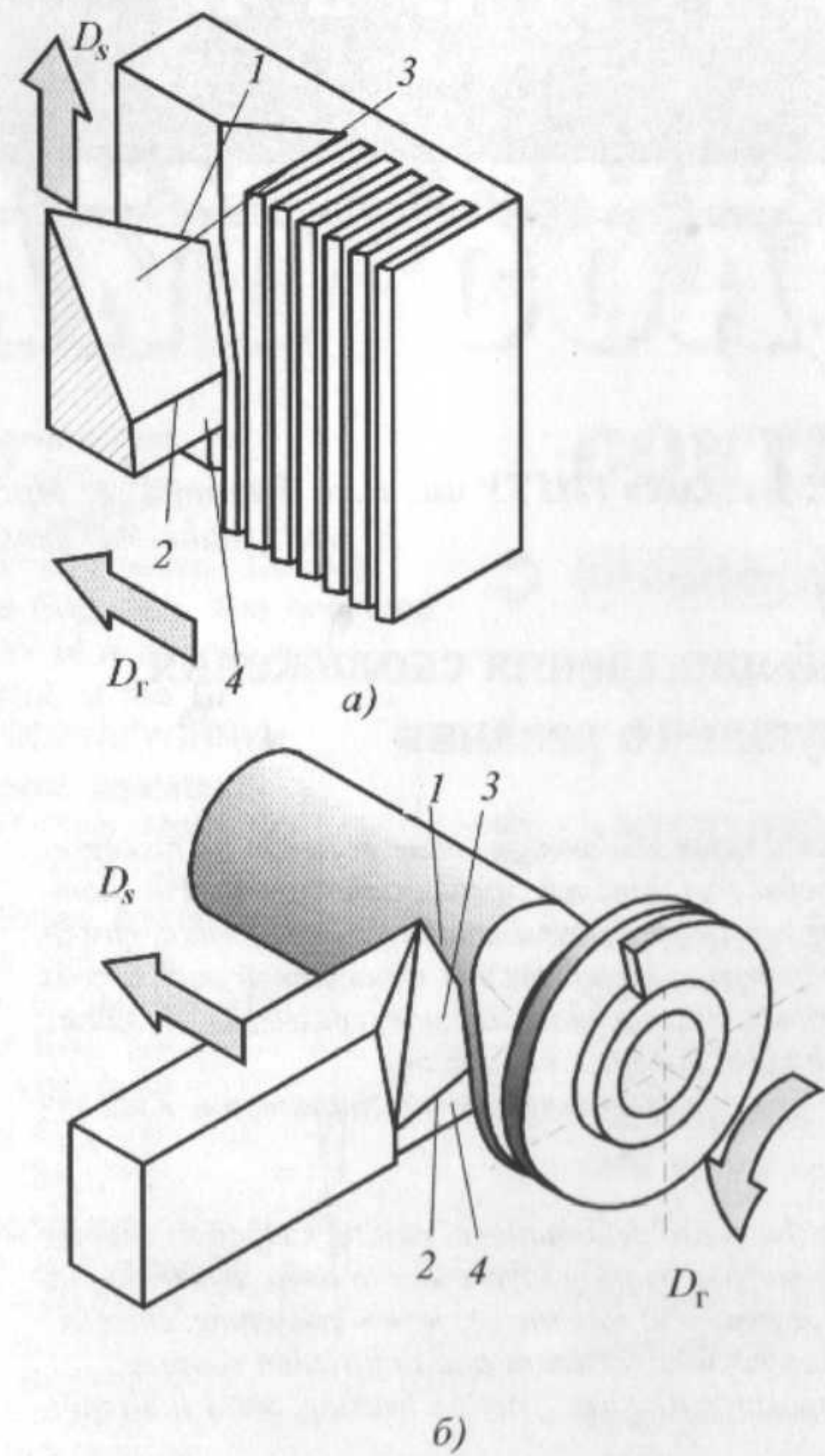


Рис. 1. Обработка по методу деформирующего резания: а – по схеме строгания; б – по схеме точения: 1 – главная режущая кромка; 2 – вспомогательная (деформирующая) кромка; 3 – передняя поверхность; 4 – вспомогательная задняя поверхность



Рис. 2. Варианты использования метода ДР для повышения износостойкости деталей трения

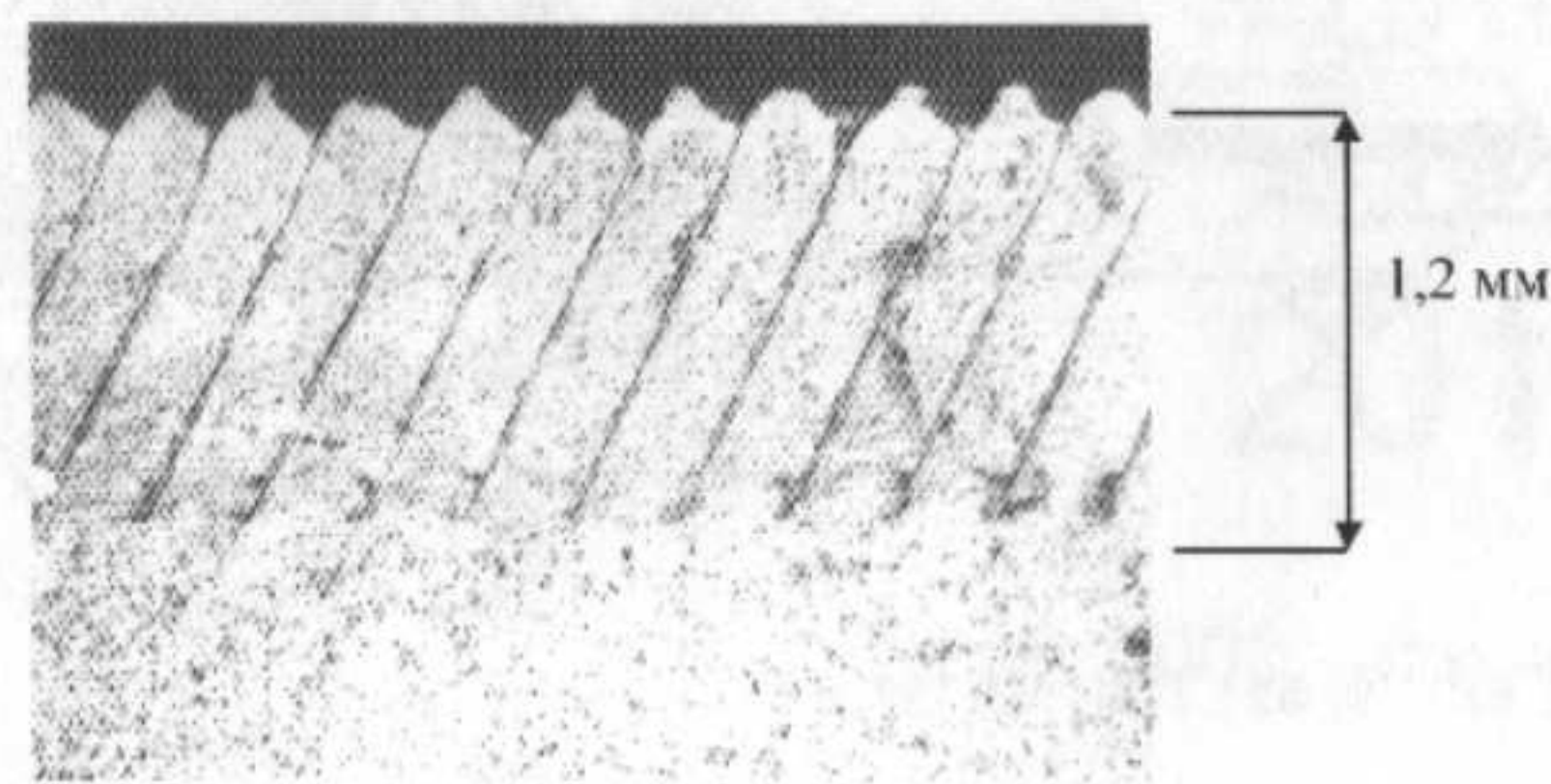


Рис. 3. Поперечное сечение поверхностного слоя детали из стали 40X13, обработанной методом ДР. Повышение твердости поверхностного слоя в 1,3 раза по сравнению с исходной

универсальном металлорежущем оборудовании. Смазочно-охлаждающие технологические среды не требуются.

К настоящему времени метод ДР нашел применение при изготовлении деталей теплообменной аппаратуры [2, 3], фильтрующих элементов [4], электрических контактов [5, 6], капиллярных структур [7] и в других областях техники. Уникальный микро- и макрорельеф, получаемый методом ДР, представляет существенный интерес для повышения износостойкости деталей трения, поскольку позволяет реализовать новые конструкторско-технологические решения, ранее не применявшиеся в мировой практике.

На рис. 2 представлены возможные варианты использования метода ДР для повышения износостойкости деталей трения.

1. Деформационное упрочнение. Суть метода заключается в получении беспористого (с нулевым межреберным зазором) оребрения методом ДР за счет "перелистывания" тонких поверхностных слоев детали (рис. 3) с формированием упрочненного слоя толщиной до 1,5 мм [8]. В процессе обработки вследствие высокой скорости и величины деформации стружки, характерных процессу резания, подрезанный слой так же, как и стружка, нагартовывается, повышается его прочность и твердость. На поверхности формируется упрочненный слой. Это аналог алмазного выглаживания или накатки роликами. Важное преимущество метода ДР состоит в создании большей толщины упрочненного слоя и отсутствии экспоненциального уменьшения твердости по глубине. Для коррозионно-стойкой стали 10X16H25M6 после обработки ДР было получено двукратное увеличение твердости поверхностного слоя. Рассматриваемый вариант перспективен для деталей трения из незакаливаемых материалов, в том числе коррозионно-стойких сталей, например деталей трения химических

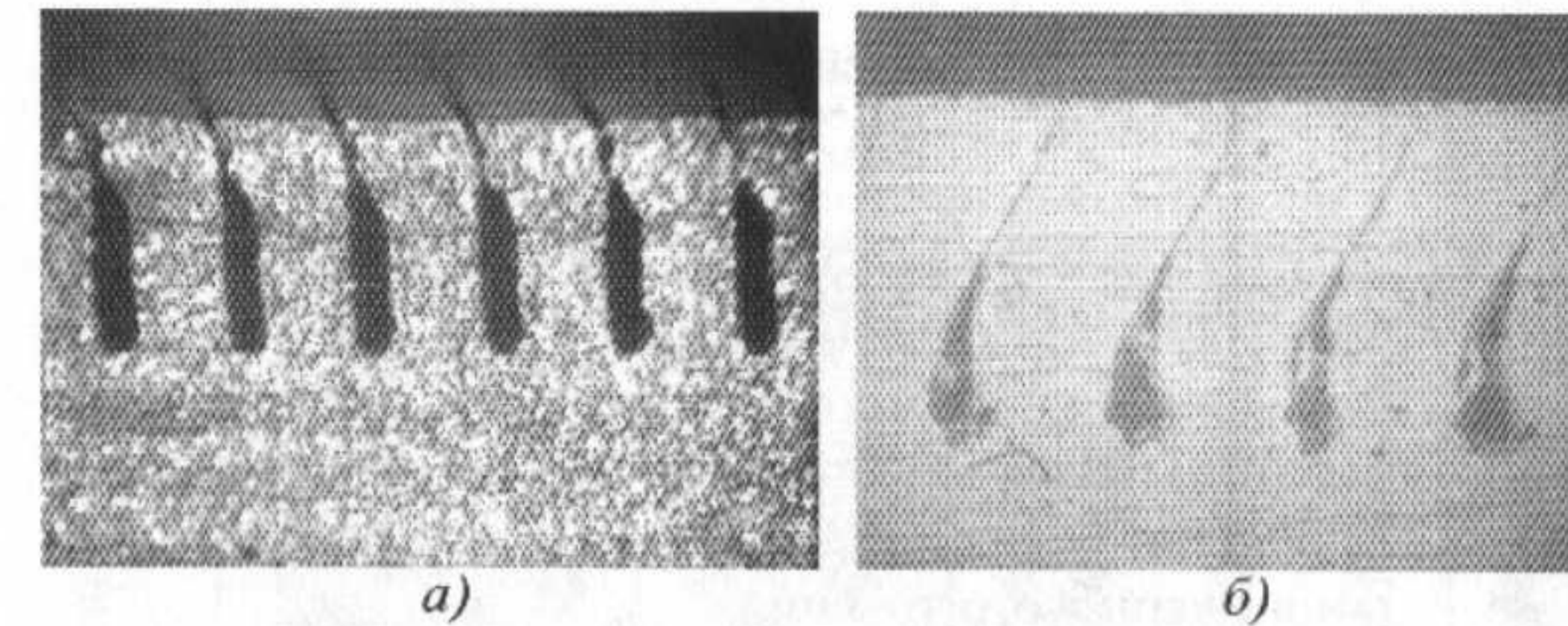


Рис. 4. Профиль приповерхностного слоя с микрополостями для удержания смазки из сталей: а – 30XГСА; б – 38X2МЮА; твердость 52...56 HRC

насосов, изготавливаемых из высоколегированных хромоникелевых нетермоупрочняемых сталей аустенитного класса.

2. Создание подповерхностных полостей для удержания смазки. Структуры, показанные на рис. 3, могут удерживать некоторое количество жидкой смазки в межреберном пространстве даже при так называемой "плотной упаковке" ребер. На наш взгляд, более перспективным является создание специальных микрополостей для удержания смазки с последующим капиллярным выходом ее на рабочую поверхность трения (рис. 4). Такая, пропитанная жидкой смазкой перед эксплуатацией или в процессе регламентного обслуживания, поверхность, в том числе на закаленных деталях, способна удерживать значительное количество смазки, которая из микрополостей по капиллярным каналам постепенно выводится на поверхность трения в процессе эксплуатации. Областью применения подповерхностных микрополостей являются детали трения, требующие периодической смазки, что позволяет увеличить сроки между регламентными работами. Поскольку вся поверхность трения имеет регулярную сетку капиллярных выходов для смазки, предполагается повышение износостойкости деталей за счет более равномерного распределения смазки по контактным поверхностям, а также за счет удаления продуктов износа в межреберные зазоры.

Подповерхностные полости могут быть получены различным образом:

– пластическим деформированием ребер, сформированных ДР с изгибом их вершин (рис. 5, а);

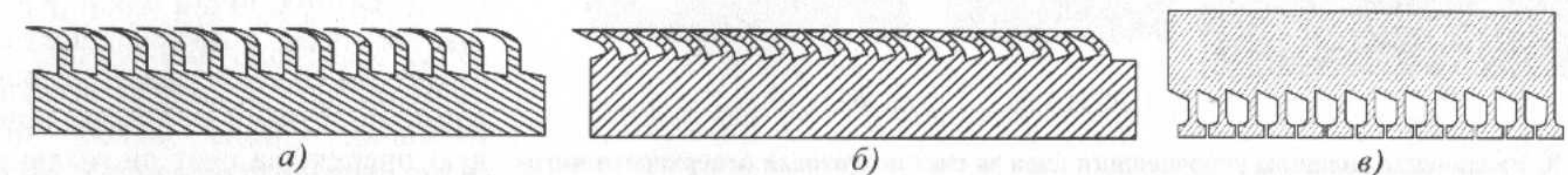


Рис. 5. Получение подповерхностных полостей совмещением деформирующего резания и последующей пластической деформации: а – с изгибом вершин ребер; б – с утолщением вершин ребер; в – с утолщением вершин и изгибом ребер

– утолщением вершин ребер (рис. 5, б);
– комбинацией деформации вершин ребер с изгибом самих ребер (рис. 5, в).

Пластическое деформирование может быть осуществлено методом обкатки гладким роликом или алмазным выглаживанием как до закалики оребренной детали, так и после.

Принцип получения подповерхностных полостей для удержания смазки за счет специальной конфигурации режущей кромки показан на рис. 6. Положения инструмента, отстоящего друг от друга на величину подачи за оборот детали S_0 , обозначены цифрами I и II. Инструмент имеет главную режущую кромку ABG , состоящую из двух прямолинейных участков, и деформирующую кромку AH . Подрезаемый слой $ABCDEF$ после прохождения по передней поверхности инструмента займет положение $AB'C'D'E'F'$, сохраняя связь с основным объемом материала в корне ребра. Пример полученных подповерхностных полостей показан на фотографии рис. 7.

3. Химико-термическая обработка микро- и макрорельефов в виде оребрения [9]. Химико-термическая обработка (ХТО) структуры, показанной на рис. 3, позволяет многократно повысить толщину упрочненного слоя за то же время обработки, благодаря легированию с боковых сторон ребер. Толщина упрочненного слоя в этом случае определяется глубиной слоя, модифицированного ДР, а не временем ХТО (рис. 8).

Практический интерес представляют возможности получения композиционных структур различных типов как с остаточной пористостью, так и беспористых. Современные исследования показывают, что лучшими характеристиками по износостойкости обладают поверхности не с большей твердостью, а с оптимальным сочетанием твердых и более мягких составляющих. Управление процессом формирования композиционной структуры с заданным составом и свойствами на поверхностях трения является важным направлением развития упрочняющих технологий. В ходе выполнения работ нами определены режимы ДР в сочетании с параметрами химико-термической обработки, позволяющие получать упрочненные композиционные структуры четырех различных типов (рис. 9). Чередование слоев высокой и низкой

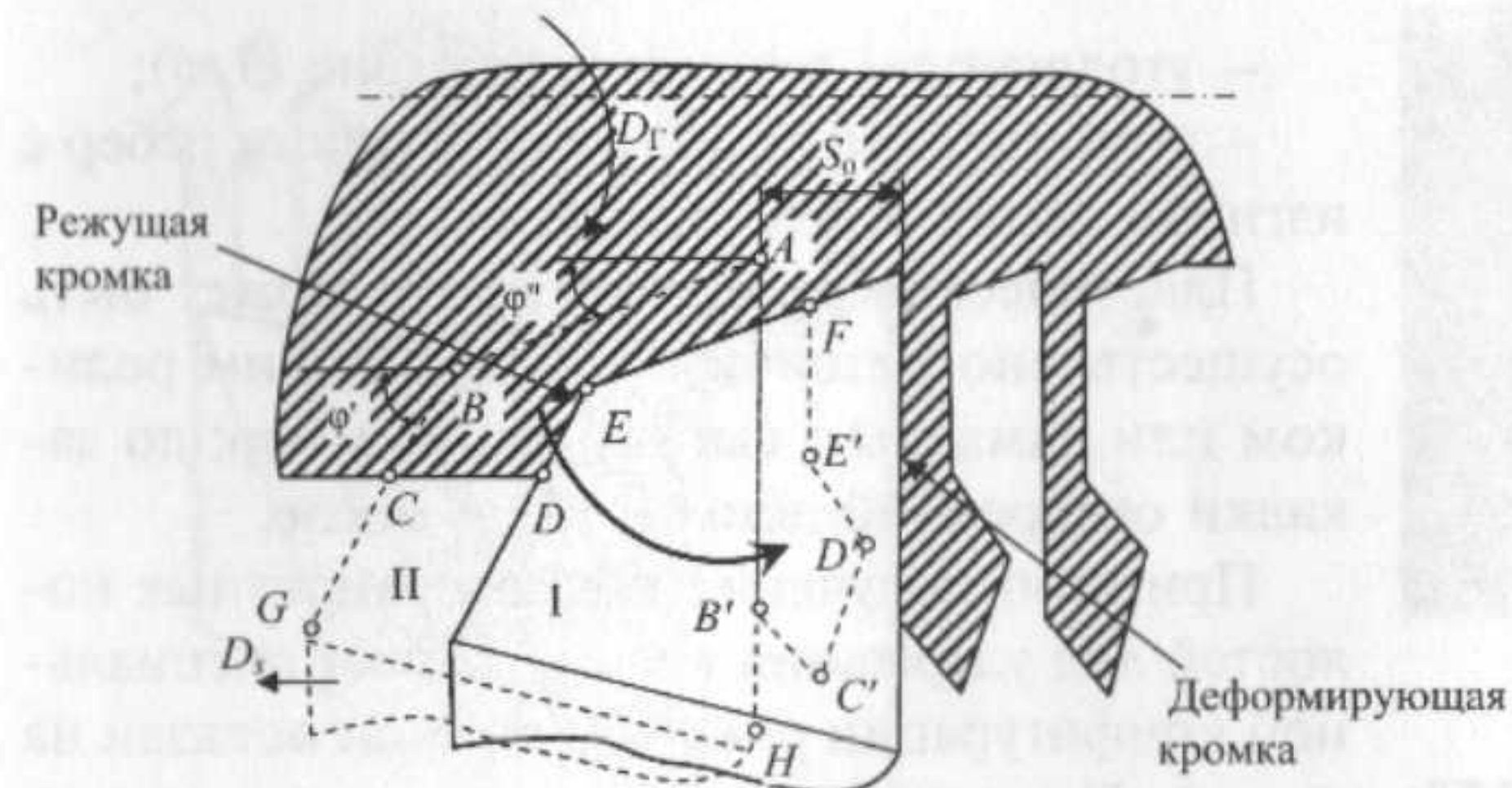


Рис. 6. Принцип формирования подповерхностных полостей инструментом для ДР с двойной режущей кромкой



Рис. 7. Профиль подповерхностных полостей, полученных инструментом для ДР на стали 38Х2МЮА

твердости, аналогично структуре дамасской стали, но не во всем объеме, а в приповерхностном слое. Пористые упрочненные структуры после ХТО заполняются твердыми смазками на основе дисульфида молибдена или фторопласта, что обеспечивает формирование самосмазывающихся поверхностей трения. Обработка была апробирована на различных сталях при использовании в качестве легирующих элементов азота, углерода, бора, алюминия, хрома и их сочетаний. Испытания в ИМАШ РАН так же, как и сравнительные испытания в НИИТАВТОПРОМЕ, выявили повышение износостойкости и снижение склонности к образованию задиров нитроцементованных поверх-

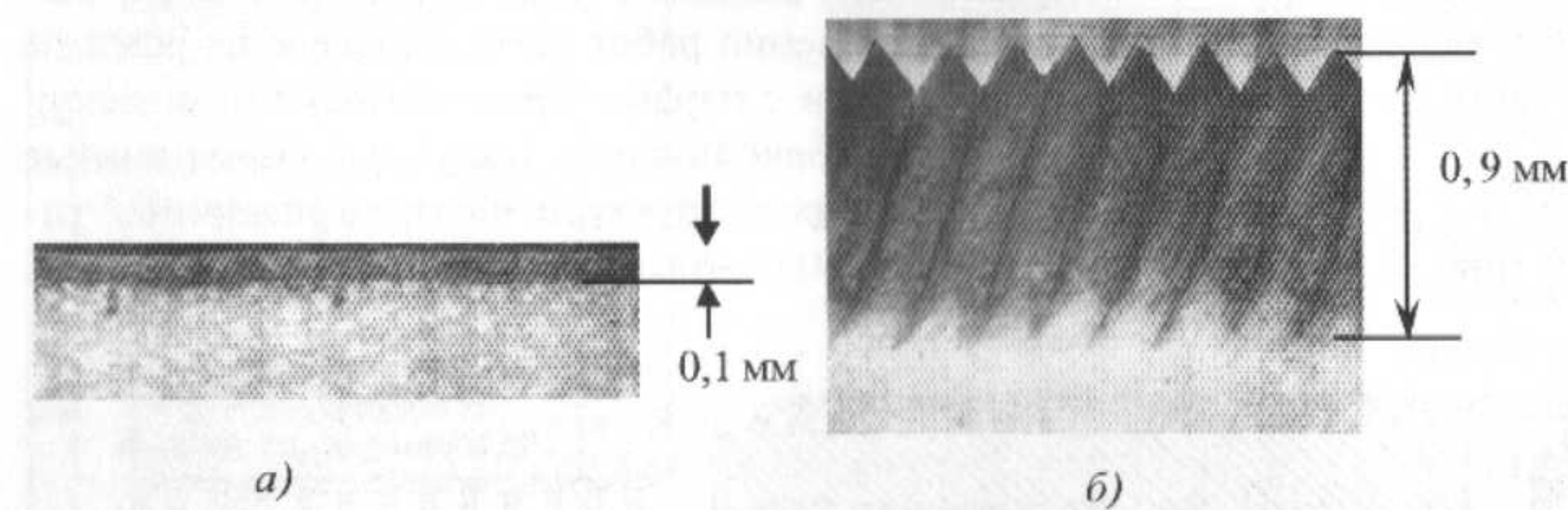


Рис. 8. Увеличение толщины упрочненного слоя за счет подготовки поверхности методом ДР. Сталь 20Х13 после одинаковой по времени низкотемпературной нитроцементации: а – ХТО без ДР; б – ХТО с подготовкой поверхности методом ДР

ностей пар трения скольжения, полученных с использованием метода ДР в 1,6...2,3 раза, в сравнении с исходными поверхностями. Технология получения композиционных структур ДР на деталях трения незначительно удорожает стоимость детали в сравнении с традиционными методами химико-термической обработки, поскольку операция ДР не является дорогостоящей и по производительности эквивалентна операции черного точения.

4. Термомеханическое упрочнение (закаливание поверхности методом ДР). Особый интерес представляет использование метода ДР для получения закалочных структур без использования термического оборудования, т.е. предлагается производить закалку непосредственно на токарном станке как последнюю операцию перед шлифованием. Это направление было предложено Н.Н. Зубковым в 2008 г., однако реализовать на практике изменение структурно-фазового состояния материала ребра при обработке методом ДР с приемлемой стойкостью инструмента удалось спустя три года В.В. Попцовым [10]. Предложенное решение может быть революционным в области металлообработки как по производительности термической обработки, так и по результату – получению упрочненных слоев с новыми, ранее неизвестными свойствами.

Известно, что пластическое деформирование, осуществляемое до или в процессе термической обработки, существенно изменяет структуру и свойства материала в сравнении с обычной закалкой. На практике такой способ получил название *термомеханической обработки* (ТМО). При высокотемпературной ТМО создаются такие условия пластической деформации и последующей закалки, при которых подавляется развитие рекристаллизационных процессов и создается особое структурное состояние, характеризующееся повышенной плотностью несовершенств и их особым распределением с образованием субструктуры полигонизации [11]. В зоне ДР при сходных с высокотемпературной ТМО температурах возможно получение высоких степеней деформации, что позволяет предположить о возможности получения структур аналогичных ТМО.

Сверхвысокие скорости нагрева и охлаждения, присущие лазерной закалке, также позволяют получать структуры со свойствами, недостижимыми другими методами, в первую очередь за счет аномального строения мартенсита, который более дисперсен, обладает большей твердостью и более высоким уров-



Рис. 9. Варианты модификации поверхностей стальных деталей на основе химико-термической обработки макро- и микрорельефов, полученных ДР

нем внутренних напряжений [12]. За время прохождения слоя материала через зону обработки ДР, которое составляет тысячные доли секунды, он нагревается до 800...1000 °С. Скорость охлаждения, так же, как и при лазерной закалке, обеспечивается теплоотводом в тело детали. Таким образом, скорости нагрева и охлаждения при ДР соизмеримы с условиями лазерной закалки.

Предлагаемый метод поверхностной закалки совмещает особенности как высокотемпературной ТМО (высокие температуры и степени деформаций), так и лазерной закалки (высокие скорости нагрева и охлаждения), при этом толщина модифицированного слоя больше, чем после лазерной закалки.

Для сталей ДР позволяет получать на наружной поверхности детали макроструктуру с полностью аустенитно-мартенситным слоем высокой твердости (так называемый "белый слой") толщиной 0,5 мм. Возможно получение структур с чередованием наклонных "белых" слоев толщиной 50...100 мкм,

микротвердостью 650...950 HV 0,1 (до 68 HRC) и менее твердыми слоями (400...550 HV 0,1) или с мягкими прослойками материала (280...360 HV 0,1) глубиной до 1,5 мм, а также с полностью аустенитно-мартенситной структурой глубиной структуры до 0,6 мм (рис. 10).

5. Подготовка поверхности под нанесение покрытий. Низкая прочность связи газотермических покрытий с основой является наиболее острой проблемой, в первую очередь, при нанесении керамических или металлокерамических материалов, свойства которых имеют значительное отличие от характеристик металлической основы по таким показателям, как коэффициент термического расширения, твердость, модуль упругости и др. В то же время именно керамические и твердосплавные покрытия обладают наилучшим комплексом свойств, обеспечивающих высокие эксплуатационные показатели деталей трения, в частности износостойкость.

Метод ДР позволяет не только многократно повысить площадь адгезионной связи наносимого покрытия с основой, но и реализовать анкерный (замковый) эффект удержания наносимого покрытия (рис. 11). Внедрение в орребренную поверхностную структуру керамических или твердосплавных порошков возможно методами детонационного, плазменного или сверхзвукового газопламенного напыления и позволяет получать покрытия, способные работать в

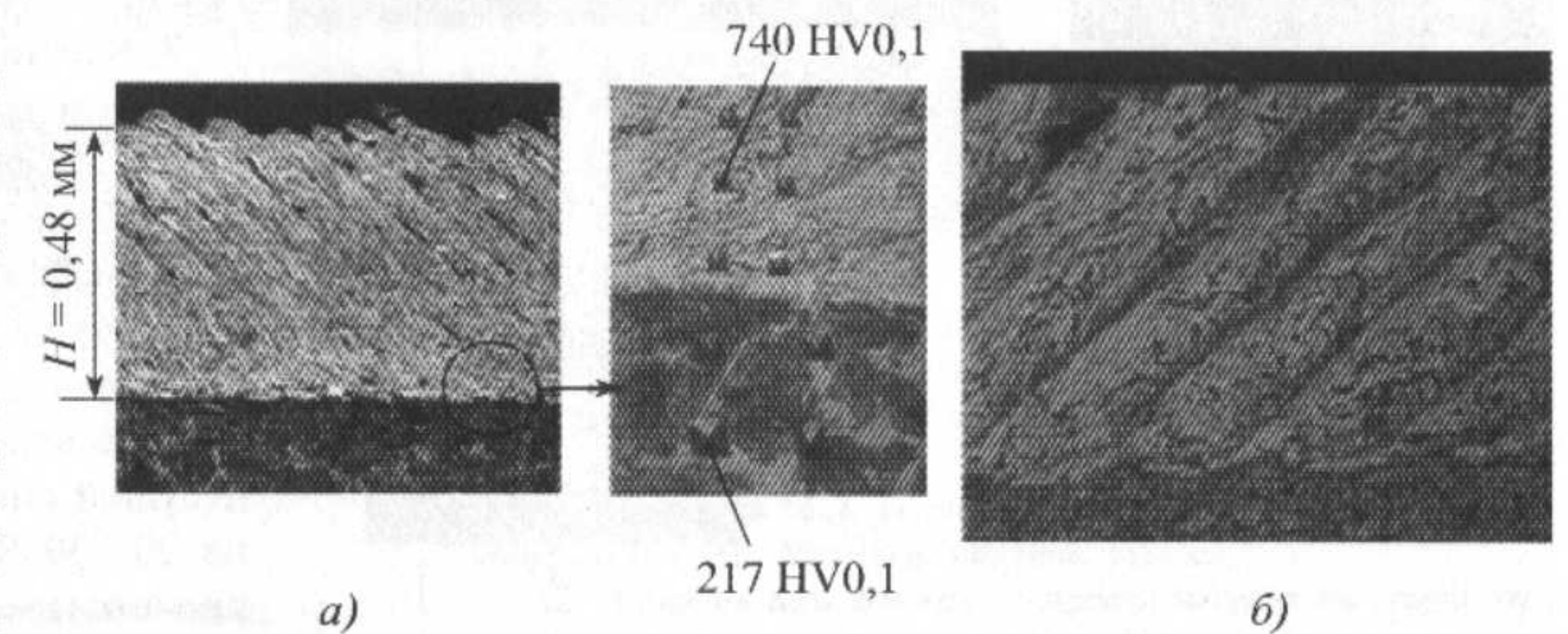


Рис. 10. Закалочные структуры стали 35, получаемые методом ДР на токарном станке: а – полностью закаленный слой; б – белые наклонные слои аустенитно-мартенситной структуры повышенной твердости в поверхностном слое детали

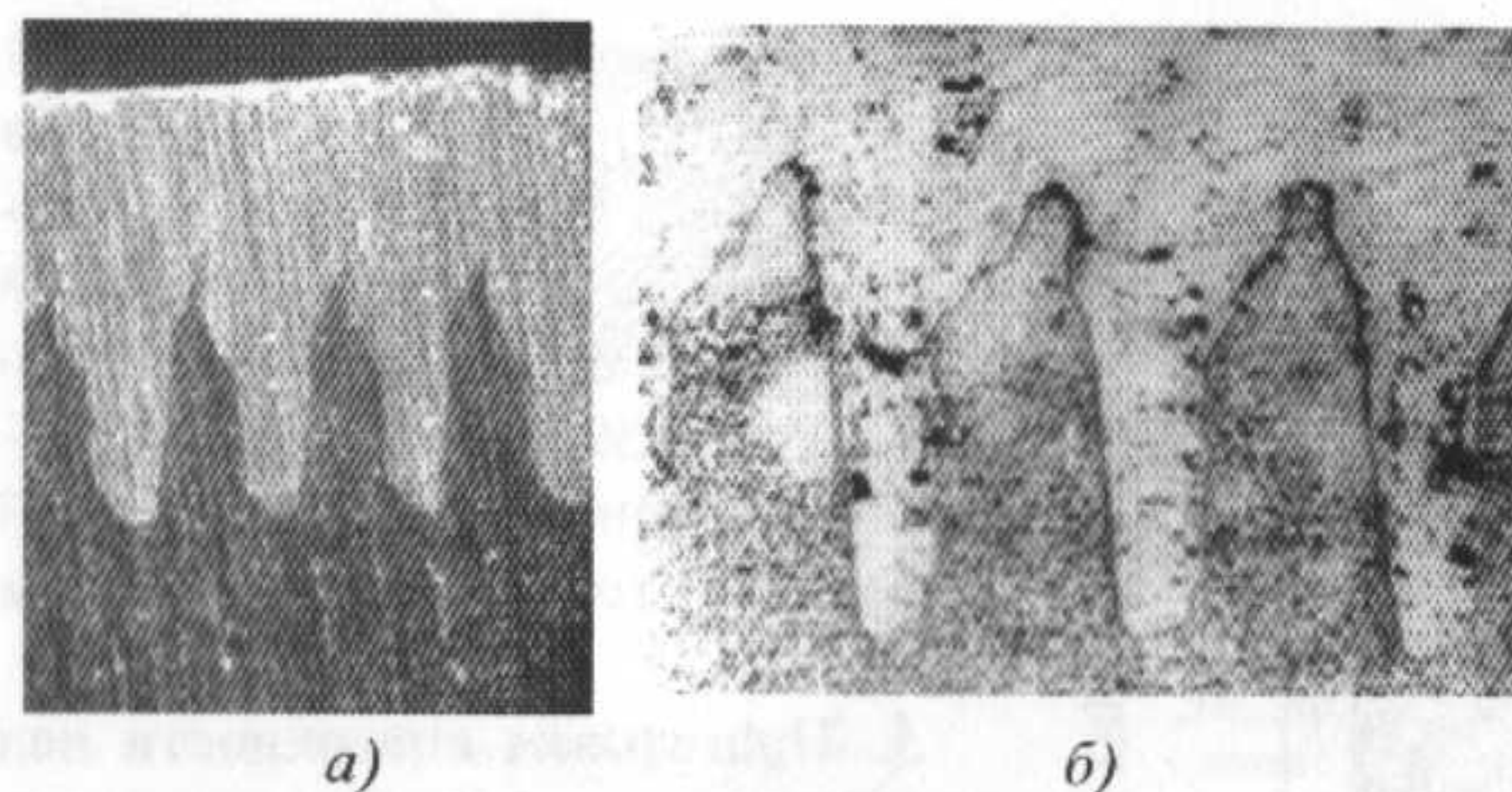


Рис. 11. Твердосплавное — WC12 (а) и керамическое — оксид алюминия (б) покрытия на валу из стали 40X с подготовкой поверхности по методу ДР

условиях динамических ударных или термоударных нагрузок.

Проведена оценка степени повышения прочности сцепления плазменно-напыленного керамического покрытия (Al_2O_3), нанесенного на оребренную поверхность стального вала при термоциклических испытаниях. Получено многократное повышение количества циклов "нагрев до 950 °С — охлаждение в воду" по сравнению с керамическими покрытиями, нанесенными на вал по традиционной технологии подготовки поверхности "рваная" резьба. На АМО ЗИЛ подтверждена работоспособность твердосплавных покрытий WC12 на кольцах деформирующей прошивки при обработке отверстий в балке передней оси автомобиля "Бычок". Покрытия наносились методом сверхзвукового газопламенного напыления (руководитель — профессор А.В. Воронцовский, МГТУ им. Н.Э. Баумана) на наружную сторону колец с поверх-

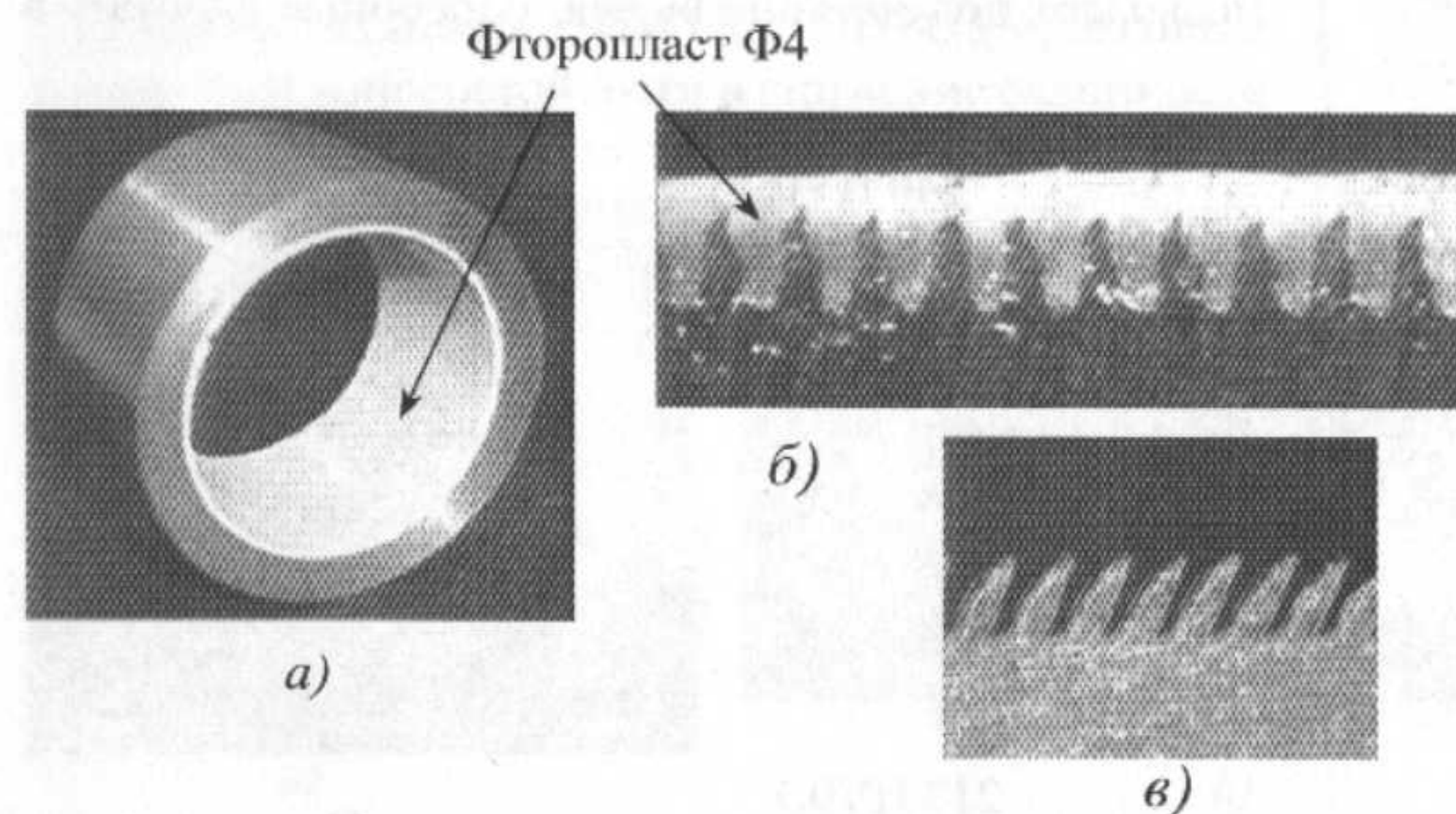


Рис. 12. Фторопластовая (F4) лента, запрессованная во внутреннюю поверхность стальной (12X18H10T) подшипниковой втулки (а, б), и поверхность фторопласта (F4), подготовленная под склеивание с другими материалами (в)

ностью в виде оребрения, подготовленной методом ДР.

Следует отметить, что в США и Евросоюзе введено жесткое ограничение на использование гальванического покрытия твердым хромом ввиду канцерогенности шестивалентного хрома, используемого в гальванопроцессе твердого хромирования. Неминуемо такой запрет распространится в ближайшем будущем и на Российскую Федерацию. Покрытие твердым хромом широко распространено и используется для повышения износостойкости деталей трения скольжения (штоки гидроцилиндров землеройной и подъемной техники, авиационных шасси и т.п.). Альтернативой этому процессу является нанесение газотермических покрытий на основе карбидов металлов (карбиды вольфрама, хрома, титана) на металлических связках (кобальт, никель, молибден и их сплавы), что в свою очередь актуализирует роль методов качественной подготовки поверхности под нанесение газотермических покрытий.

6. Формирование твердосмазочных структур и покрытий. Макрорельеф, полученный ДР, может быть эффективно использован для удержания на поверхности фторопластовых покрытий или покрытий из других полимеров, обладающих низким коэффициентом трения (полиамиды, анид, капрон и др.). На рис. 12 представлены внешний вид и поперечный срез подшипника скольжения из коррозионно-стойкой стали 12X18H10T с фторопластовым покрытием. Здесь, так же как и в случае износостойких покрытий, прочность связи с основанием обеспечивается не столько адгезионной связью, сколько замковым эффектом механического удержания покрытия.

Стальная поверхность, в том числе закаленная, также может содержать *твердосмазочный материал* (ТСМ) не только в виде покрытия, но и в виде вертикальных прослоек, выходящих на поверхность трения (рис. 13).

7. Восстановление размеров и свойств поверхности изношенных деталей трения. Восстановление изношенных поверхностей методом ДР заключается в перераспределении материала поверхности восстанавливаемой детали и увеличения ее линейных размеров до 0,8 мм на диаметр за счет создания поверхностной пористости в виде узких глубоких канавок. Потеря несущей способности восстановленной детали на 20...30 % компенсируется повышенными прочностными характеристиками материала ребер. В некоторых случаях при восстановлении посадочных мест подшипников устранения поверхностной пористости не требуется. Получено увеличение усилий запрессовки-распрессов-

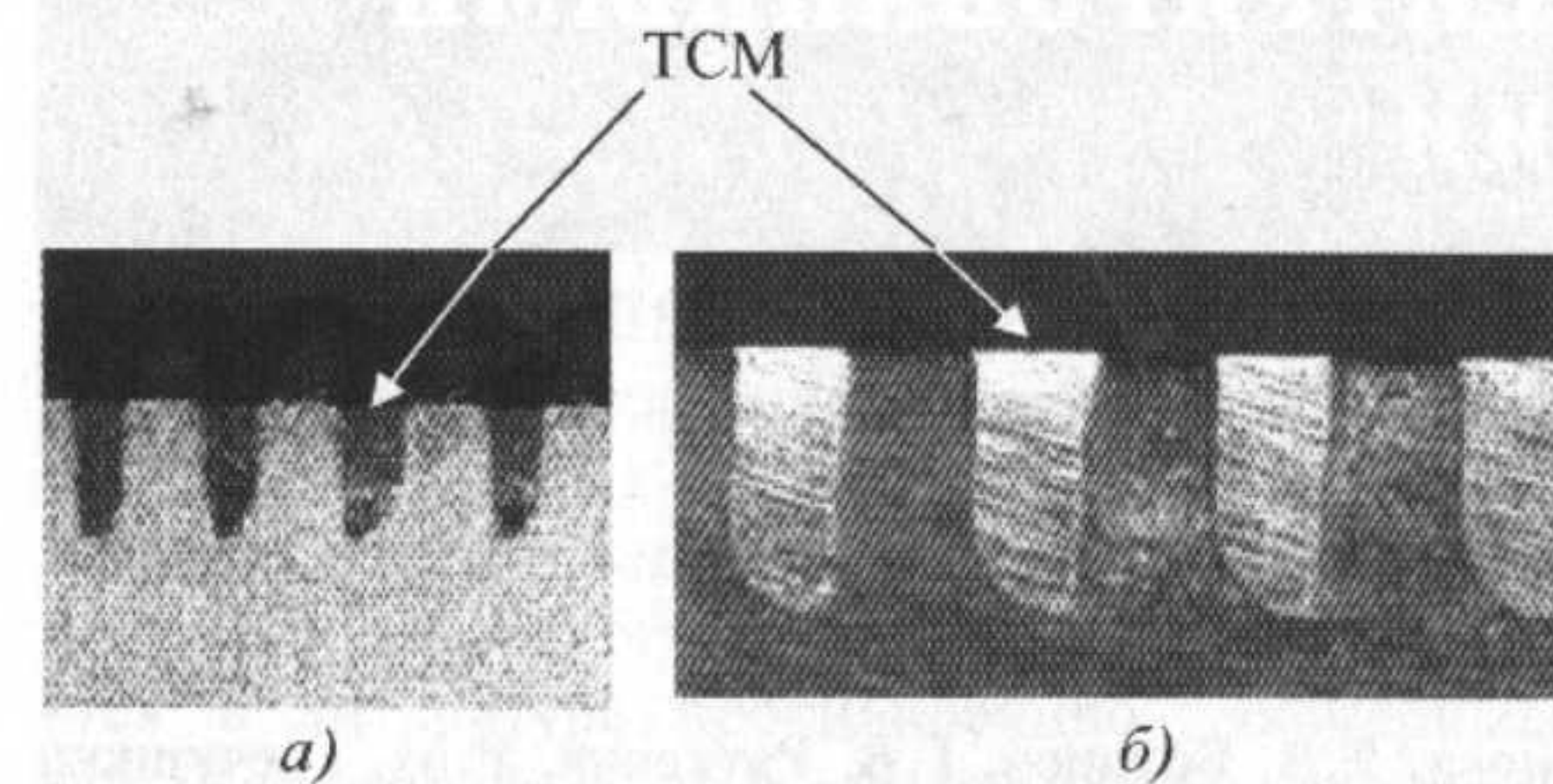


Рис. 13. ТСМ в структуре поверхности трения: а — полимеризованная фторопластовая эмульсия с дисульфидом молибдена; б — твердосмазочная композиция на основе меди

ки подшипников на восстановленной методом ДР поверхности по сравнению с неизношенным валом при одинаковых величинах натягов (в том числе при многократном снятии подшипника), что свидетельствует о работоспособности предложенного варианта [13].

В случае необходимости устранения поверхностной пористости (например для сальниковых уплотнений) возможно заполнение канавок по методам, представленным в п. 3, 5, 6 и п. 2 (для случая с полным закрытием капиллярного выхода на поверхность трения). Апробирован также вариант уменьшения поверхностной пористости методом электроискрового легирования (рис. 14, а). Предлагаемая технология позволяет восстанавливать не только размеры, но и свойства поверхности деталей, зачастую с повышением характеристик, в сравнении с исходными для новых деталей.

Наиболее простым способом устранения пористости рельефа, полученного ДР, является заполнение межреберных зазоров современными металло- или керамиконаполненными компаундами (ремонтными составами) (рис. 14, б). На фотографии рис. 14, б вид-

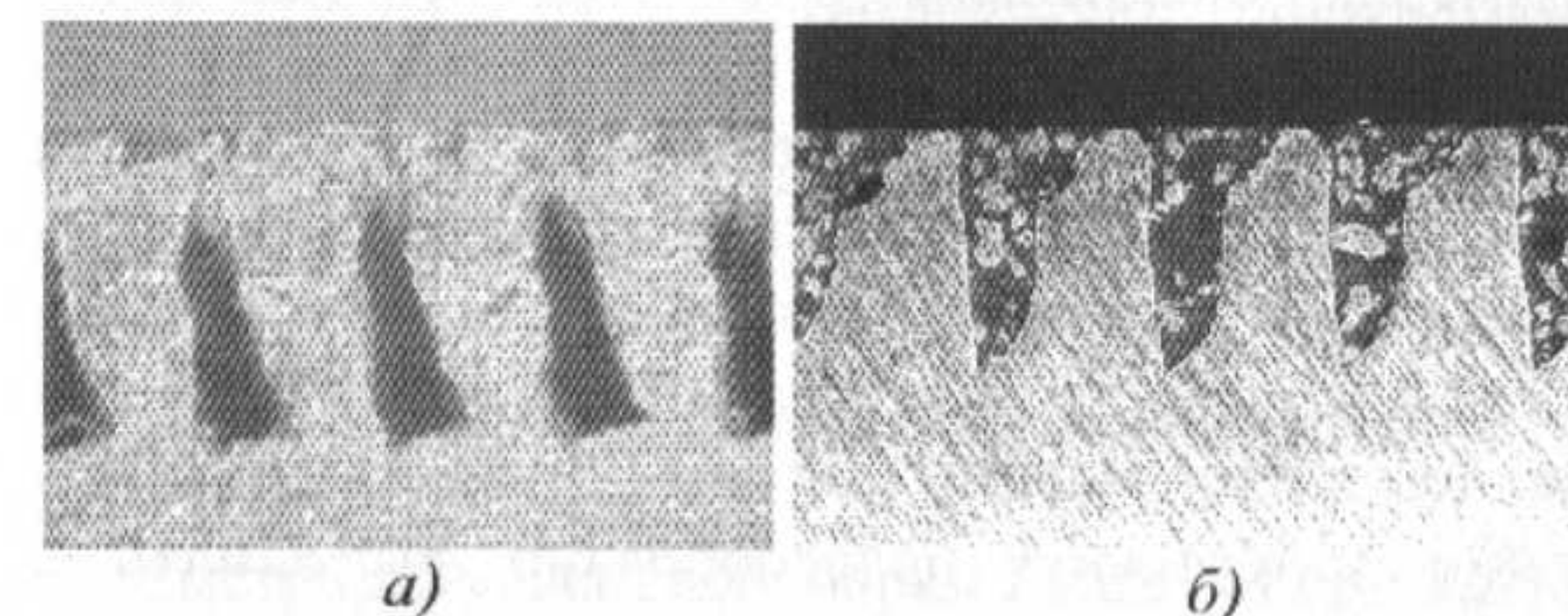


Рис. 14. Структура поверхности восстановления валов: а — сталь 38ХМЮА после устранения поверхностной пористости электроискровым легированием, увеличение диаметра на 0,6 мм; б — сталь 40X с заполнением межреберного зазора керамиконаполненным ремонтным составом

но, что ребра выступают на поверхность восстановленной детали и контактные нагрузки воспринимаются металлом основной детали, а не ремонтным составом.

Анализируя рассмотренные варианты, можно сделать вывод о том, что на основании метода деформирующего резания могут быть предложены новые конструкторско-технологические решения для проектирования и изготовления деталей и узлов трения скольжения. Опираясь на предложенные решения, можно создавать упрочненные приповерхностные композитные структуры, самосмазывающиеся поверхности трения, производить поверхностную закалку непосредственно на том же оборудовании, которое используется при изготовлении деталей, подготавливать поверхность для повышения прочности сцепления покрытий с основным материалом детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pat. 5775187 USA, Int. Cl. B23B 17/00. Method and apparatus producing a surface with alternating ridges and depressions / N.N. Zoubkov (РФ), A.I.Ovtchinnikov (РФ). № 545640. 1998.
2. Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // Новости теплоснабжения. 2005. № 4. С. 51–53.
3. Pat.7637012 USA, Int. Cl.B21D51/06; Method of forming protrusions on the inner surface of a tube / P.Thors, N. Zoubkov. 2009.
4. Зубков Н.Н., Слепцов А.Д. Получение полимерных щелевых фильтрующих труб методом деформирующего резания // Вестник машиностроения. 2010. № 12. С. 51–53.
5. Novel Electrical Joints Using Deformation Machining Technology. Part I. Computer Modeling / L. Solovyeva, N. Zubkov, B. Lisowsky etc. // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. 2012. Vol. 2. № 10. P. 1711–1717.
6. Novel Electrical Joints Using Deformation Machining Technology. Part II. Experimental Verification / L. Solovyeva, N. Zubkov, B. Lisowsky etc. // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. 2012. Vol. 2. № 10. P. 1718–1722.
7. Продольные капиллярные каналы для тепловых труб / А.И. Абросимов, В.К. Сысоев Н.Н. Зубков и др. // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 123–125.
8. Васильев С.Г., Шуляк Я.И. Изменение твердости поверхности детали методом механической обработки // Известия вузов. Сер. "Машиностроение". 2011. № 11. С. 77–82.
9. Пат. 2015202 РФ. Способ упрочнения поверхности детали / Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, С.Г. Васильев и др. // Изобретения. 1994. № 12.
10. Васильев С.Г., Пошлов В.В. Повышение твердости поверхности детали термическим воздействием методом деформирующего резания // Изв. вузов. Сер. "Машиностроение". 2011. № 12. С. 37–43.
11. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Т. 2. М.: Металлургия, 1968. 1171 с.
12. Сняжков К.А. Влияние скорости нагрева на структуру и свойства инструментальных сталей // Инструмент и технологии. 2006. № 23. Вып. 1. С. 151–158.
13. Зубков Н.Н. Ремонт, восстановление и модернизация на основе метода деформирующего резания // Ремонт, восстановление, модернизация. 2003. № 10. С. 7.