

## Список літератури

1. Mechanical Engineering Handbook. Frank Kreith Ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999
2. Пасечник В. А., Петраков Ю. В., Кореньков В. Н. Ограничение подвижности деталей в сборочной единице – основа математической модели сборочного изделия // Technika i technologia montazu maszyn. – 2008. – z.72. – С. 29-36.
3. Boothroyd G. Product design for manufacture and assembly // Computer Aided Design. – 1994. – Vol. 26, №9. – P. 505-520.
4. Lucas Engineering Systems Ltd., University Of Hull, Design For Assembly / Manufacture Analysis Practitioners Manual, Version 10.5, CSC Manufacturing, Solihull, UK, 1995.
5. Korenkow W., Pasiecznik W., Łaszina J. Procedura ukierunkowanej analizy DFA dla jednostek montażowych // Technologia i automatyzacja montażu. Ogólnopolski Kwartalnik Naukowo-Techniczny Nr 4 (62) październik – grudzien 2008. P. 11–14.
6. Сімута Р. Р. Забезпечення якості і прискорення технологічної підготовки механоскладального виробництва: Дис. канд. техн. наук: 05.02.08. – К.: НТУУ «КПІ», 2003. – 133 с.
7. Koller R. Konstruktions methode für den Maschinen – Geräte und apparatebau – Berlin: Springer – Verlag, 1976. – 184 p.
8. Кореньков В.М., Пасічник В.А., Сімута Р.Р. Аналіз з'єднань, що забезпечують нерознімність складальних одиниць та виробів, і деякі способи визначення таких з'єднань // Вісник технологічного університету Поділля. – 2002. – №4/ч.1. – С.48-52.
9. Пасічник В.А., Лашина Ю.В. Виявлення кінематичних з'єднань у складальній одиниці на основі інформації про бінарні відношення обмеження рухливості // Труды Одесского политехнического университета: Науч. и произв.-практ. сб. по техн. и ест. наукам. – Одесса, 2008. – С. 31-35.

УДК 612.431.75

**А.В.Титов<sup>1</sup>, м.н.с., Ю.А.Хохлова<sup>2</sup>, м.н.с., А.Д.Лавриненков<sup>1</sup>, студ.  
1-НТУ України «Київський політехнічний інститут», 2- Інститут  
Електросварки ім. Е.О. Патона НАН України г.Київ, Україна**

### **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВЫГЛАЖИВАНИИ**

---

*Проведено вигладжування високоміцного сплаву VT-22 з додатковим ультразвуковим впливом на інструмент. Досліджено вплив обробки титанових сплавів вигладжуванням на шорсткість поверхні та зміцнення поверхневого шару деталі.*

*Burnishing of high-strength titanium alloys with special device with additional ultrasonic load on the tool is carried out. The influence of burnishing of titanium alloys on roughness of surface and hardening of surface layer is researched.*

---

#### Введение

Повышение надежности и ресурса изделий является важнейшей задачей современного машиностроения. Эти эксплуатационные характеристики определяют в целом эффективность таких изделий машиностроения, как летательные аппараты, авиационные двигатели, автомобили и другие. Работоспособность и надежность машины в значительной степени зависят от качества поверхности деталей, поскольку, отказ изделий происходит, как правило, вследствие повреждений усталостного характера. Известно, что зарождение усталостной трещины начинается с поверхности

заготовки или в приповерхностном слое [1, 2], на финишных операциях изготовления ответственных деталей изделий производят отделочно-упрочняющую обработку методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Эта обработка позволяет улучшить параметры качества поверхностного слоя деталей, уменьшить вероятность появления усталостной трещины при эксплуатации деталей, повысить тем самым надежность и ресурс изделий в целом. Одним из наиболее эффективных методов ППД является выглаживание.

Обеспечение эффективности эксплуатации конструкций также связано с применением материалов с низкой плотностью, высокой удельной прочностью и жесткостью. Такими материалами являются титановые сплавы – современная альтернатива традиционным конструкционным сталям. Однако при использовании выглаживания для обработки титановых сплавов возникает ряд трудностей, связанных с их малой теплопроводностью, низкими антифрикционными свойствами, склонности их к холодному свариванию с инструментом [3, 4]. Поэтому решение научно-прикладной задачи выглаживания титановых сплавов является актуальной для современного машиностроения.

Одним из возможных путей решения данной задачи было использование новых созданных технологических сред, позволяющих эффективно обрабатывать титановые сплавы [3]. Также, были проведены экспериментальные работы по выглаживанию сплава ВТ-23 с использованием твердой смазки и проанализировано влияние режимов обработки на величину зерна в приповерхностном слое после обработки [4]. Однако, это усложняет технологический процесс, поскольку требует нанесения и удаления слоя смазки после обработки.

Улучшить условия взаимодействия инструмента и детали можно дополнительным ультразвуковым воздействием на инструмент. Экспериментальные работы по влиянию выглаживания с дополнительным ультразвуковым нагружением инструмента (ультразвукового выглаживания) на шероховатость поверхности проведено на титановом сплаве ВТ-22 в работе [5].

Целью данной работы является исследование формирования структуры и механических свойств поверхностного слоя деталей из высокопрочных титановых сплавов ультразвуковым выглаживанием.

#### Методика выполнения экспериментальных работ

Экспериментальные работы проводились на образцах из высокопрочных титановых сплавов ВТ-22 и ВТ-23 цилиндрической формы с наружным диаметром 10 мм и 30 мм. Перед выглаживанием образцы обрабатывались чистовым точением.

Для реализации процесса ультразвукового выглаживания было спроектировано и изготовлено специальное устройство и разработана методика экспериментальных исследований. Первоначально отработка методики была проведена на алюминиевом сплаве Д-16 (рис. 1), после чего проводился эксперимент с титановыми сплавами. Обработка образцов выполнялась следующим образом. Заготовке 1, закрепленной в патроне 2 токарного станка 3, задавалось вращательное движение. Обработка производилась выглаживателем 4, закрепленным в специальном устройстве для

ультразвукового выглаживания 5. Усилие выглаживания устанавливалось с помощью тарировочного графика по индикатору 6.

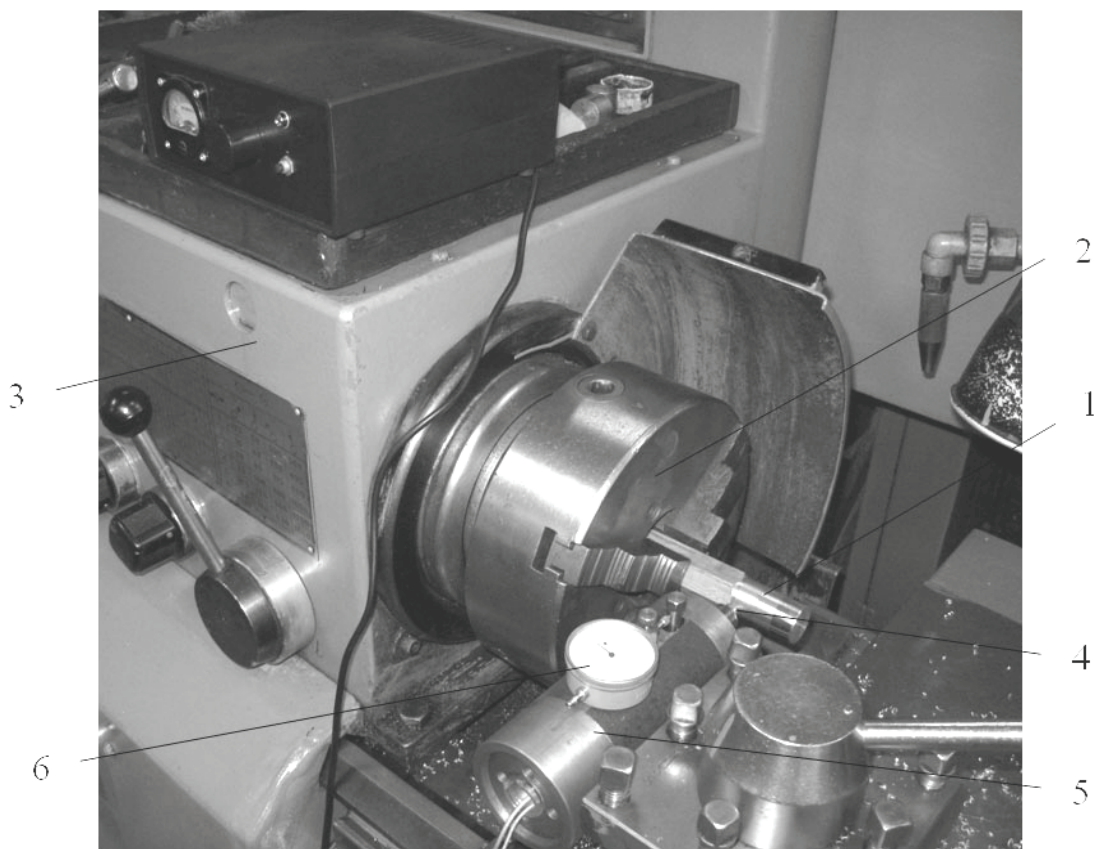


Рис. 1. Специальная установка для ультразвукового выглаживания

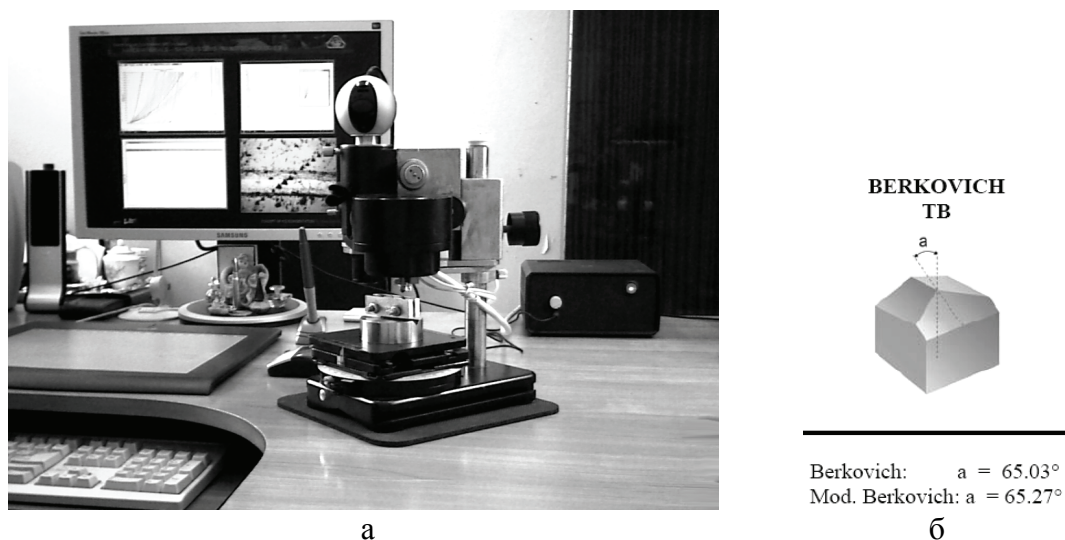
Ультразвуковое выглаживание проводилось по режимам обычного выглаживания выглаживателями с кристаллом АКТМ и с использованием индустриального масла И-20 в качестве смазки.

Замер шероховатости после обработки образцов ультразвуковым выглаживанием проводился с использованием специальной установки, состоящей из профилометра цехового, аналогово-цифрового преобразователя для последующего ее анализа с использованием компьютера [5].

Для исследования распределения механических свойств материала образцов после обработки алмазным выглаживанием использовался прибор «Микрон-гамма» (рис. 2), предназначенный для определения микро-механических свойств материалов методами: непрерывного вдавливания индентора, сканирования, металлографии и топографии.

Компьютеризированная система прибора включает в себя: индентор Берковича (рис. 2б); шток с датчиком регистрации глубины внедрения индентора, механизм нагружения с широким диапазоном нагрузок; видеокамеру и микроскоп (x200-1000); автоматизированную систему позиционирования образца с программой цифровой навигации по исследуемому объекту, позволяющей произвести прицельный укол индентором в выбранный микро-объект структуры. Для уменьшения вибрации прибор установлен на виброизолирующей подставке (рис. 2а). Перемещение индентора

замеряется с точностью 0,001 мкм и позволяет проводить испытания при нагрузках 0,01г - 500г и небольших глубинах отпечатка. Полученная диаграмма



а

б

Рис. 2. Прибор «Микрон-гамма»:

а – общий вид прибора, б – используемый в приборе индентор Берковича

„нагружение-разгрузка“ состоит из 2000 точек. Обработка результатов индентирования выполняется специализированной программой и позволяет автоматически определять значения твердости и модуля Юнга при регистрации перемещения вершины индентора.

Данный прибор позволяет непрерывно фиксировать в процессе нагружения силу  $P$  и при этом определяет глубину не только восстановленного  $h_2$ , но и невосстановленного  $h_1$  отпечатков, а также работу пластической  $A_{об}$  и упругой  $A_{уп}$  деформации, модуль упругости  $E$ , ГПа и другие характеристики материала (рис. 3) [6].

Процесс вдавливания индентора описывается в виде диаграмм (рис. 4).

Для определения упрочнения поверхностного слоя после обработки определяли значения микротвердости по следующим формулам [6]:

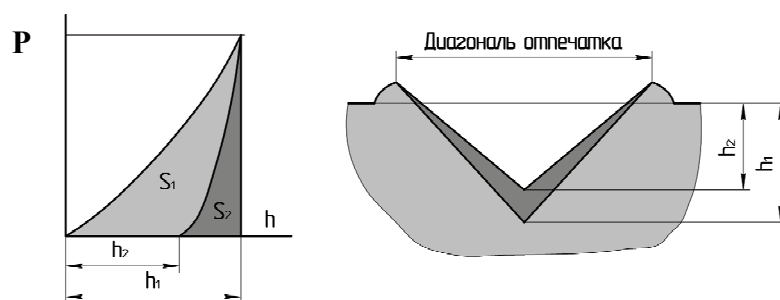


Рис. 3. Схема определения твердости по диаграмме вдавливания индентора (а) и по диагонали отпечатка (б):  $S_1$  и  $S_2$  – работа пластической и упругой деформации соответственно [6]

$$H \text{ (Мартел)} = (S_1/0,817) / h_1,$$

$$H_H \text{ (Мейер)} = ((0,1/0,245) \cdot P) / h_1^2, \quad (1)$$

$$H \text{ (Мейер)} = ((0,1/0,245) P) / h_c^2.$$

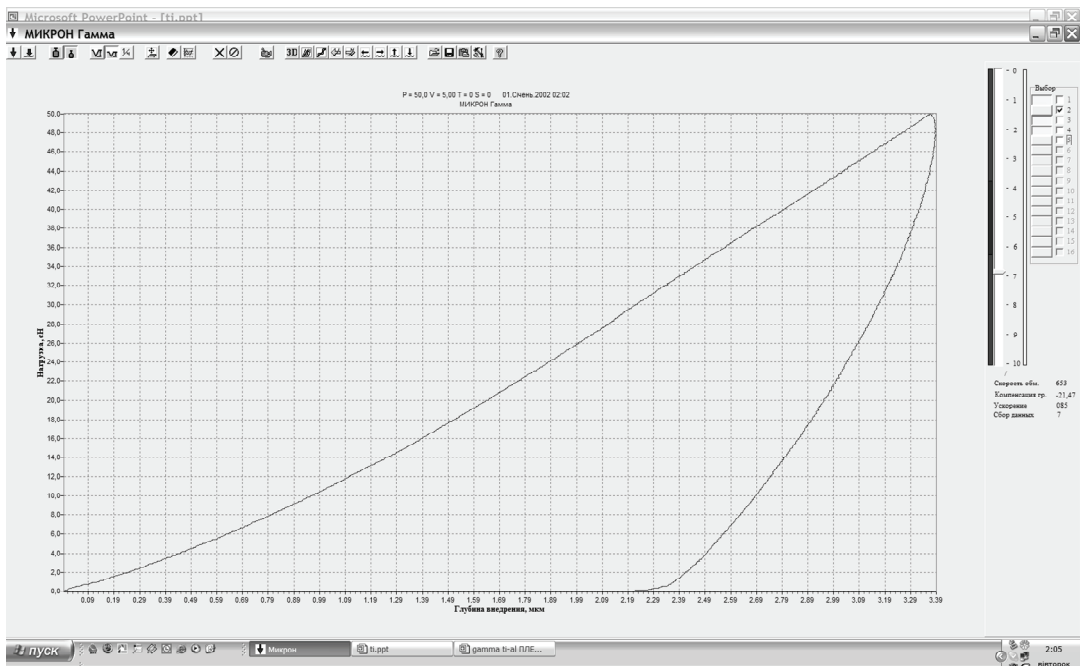


Рис. 4. Окно программы с диаграммой описывающей вдавливание индентора  
 Расчетные данные сводятся в таблицу в электронную таблицу (рис. 5)

↓ Таблица расчетов

№	P, гр.	V, гр/с	T, с.	h1, мкм	hc, мкм	h2, мкм	H(Мартел)	Hн(Мейер)	H(Мейер)	E, GPa	Aоб	Aуп	s (пласт)	K пласт	Напр. GPa
1	50,0	5,0	0	1,891	1,485	0,985	7,425	5,708	9,259	106,9	41,01	29,89	0,271	0,752	1,510
2	50,0	5,0	0	1,299	0,894	0,200	15,810	12,090	25,550	177,9	28,33	27,61	0,026	0,642	3,199
3	50,0	5,0	0	2,509	2,119	1,551	4,320	3,241	4,547	77,9	55,77	27,09	0,514	0,825	0,858
4	50,0	5,0	0	2,633	2,205	1,716	3,693	2,944	4,198	68,3	55,07	30,35	0,449	0,806	0,779
5	50,0	5,0	0	2,773	2,374	1,750	3,239	2,653	3,621	68,0	56,45	26,69	0,527	0,823	0,702
6	50,0	5,0	0	2,666	2,212	1,710	3,658	2,871	4,171	64,1	56,65	25,90	0,543	0,799	0,760
7	50,0	5,0	0	2,790	2,367	1,866	3,207	2,621	3,644	64,3	56,92	26,14	0,541	0,814	0,694
8	50,0	5,0	0	2,677	2,253	1,734	3,595	2,848	4,020	67,5	56,34	27,56	0,511	0,812	0,754
9	50,0	5,0	0	2,609	2,163	1,687	3,836	2,999	4,362	66,9	55,62	24,67	0,556	0,800	0,794
10	50,0	5,0	0	2,528	2,094	1,592	4,322	3,192	4,653	70,9	57,08	28,09	0,508	0,810	0,845
11	50,0	5,0	0	2,792	2,311	1,837	3,241	2,618	3,820	58,0	57,64	28,03	0,514	0,792	0,693
D				0,441	0,431	0,472	3,564	2,696	6,200	32,997	8,830	1,587	0,154	0,050	
M				2,470	2,043	1,512	5,122	3,980	6,531	80,973	52,444	27,456	0,451	0,789	
%				17,8	21,1	31,2	69,6	67,7	94,9	40,8	16,8	5,8	34,2	6,3	

Отступ % 10 dP % 10 Расчет Закрывать Печать Форма Редактор

Рис. 5. Результаты замеров сведенные в электронную таблицу

Результаты исследования и их обсуждение

Фактура поверхности после обработки ультразвуковым выглаживанием показана на рис. 6.

Исходная поверхность образца после чистового точения характеризуется направленным макрорельефом в виде канавок – следов режущего инструмента (рис. 6,а). После обработки ультразвуковым выглаживанием фактура поверхности имеет

сформированный однородный микрорельеф, как в продольном, так и в поперечном направлениях (см. рис. 6,б), а следы предыдущей обработки отсутствуют.

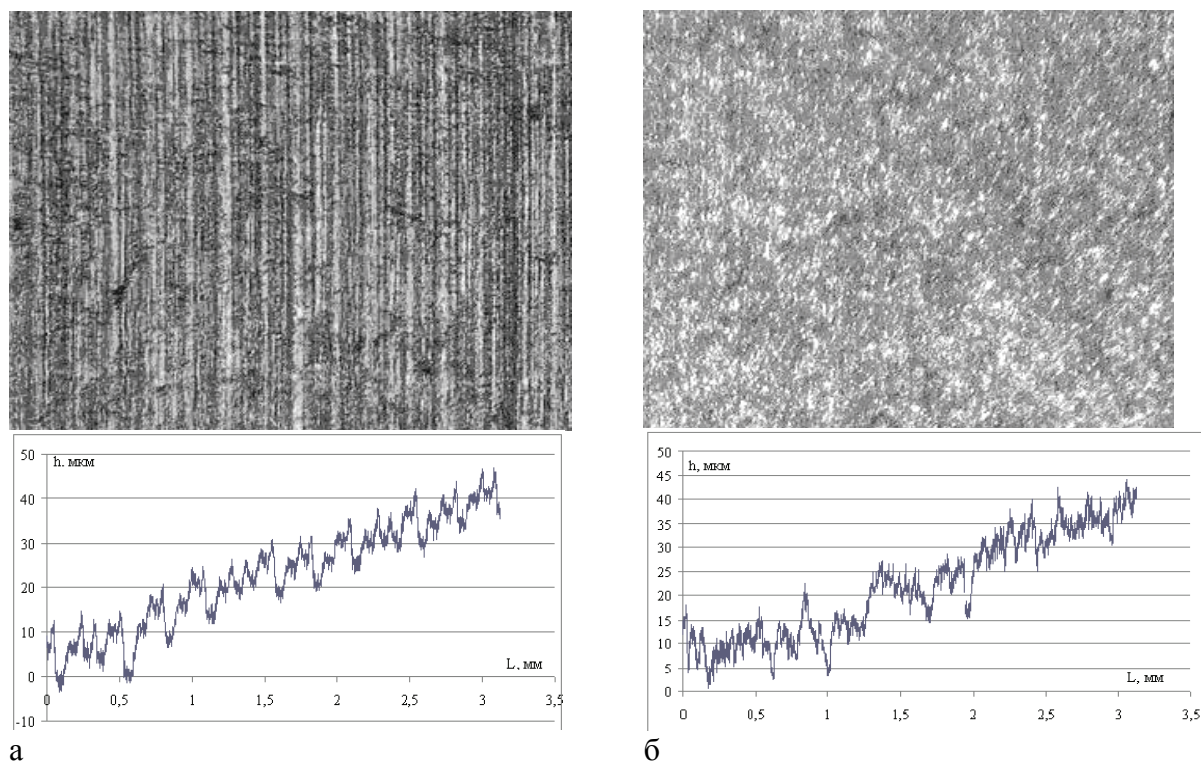


Рис. 6. Поверхность образца после различных режимов обработки (увеличение 10х): а – чистовое точение; б – ультразвуковое выглаживание

Сравнение результатов замеров шероховатости приведено на диаграмме (рис. 7).

Минимальная шероховатость поверхности образца соответствует ультразвуковому выглаживанию. Большая величина шероховатости после обычного выглаживания объясняется наличием надрывов на поверхности заготовки.

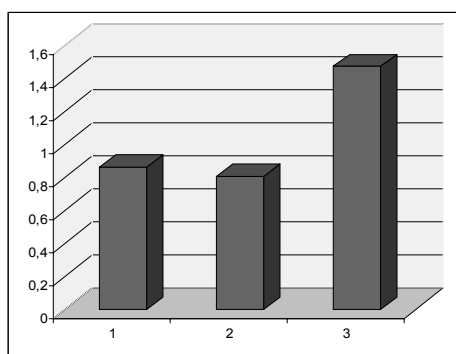


Рис. 7. Значение шероховатости ( $R_a$ ) поверхности образцов после различных видов обработки:

- 1 – чистовое точение,
- 2 – ультразвуковое выглаживание,
- 3 – обычное выглаживание сплава ВТ-22

Для металлографических исследований образцы разрезались электроэрозионным способом и по стандартной методике были подготовлены микрошлифы для последующих исследований на приборе «Микрон-гамма». Структура материала в приповерхностном слое после обработки и центральной недеформированной части (исходная структура) показаны на рис. 8).

Установлено, что вследствие деформирования в поверхностном слое происходит значительное измельчение зерен.

Определения упрочнения индентированием, также, проводили на трёх участках: у

кромки образца, в приповерхностном слое – переходной части, центральной (исходной, неупрочненной) части образца. Каждая серия уколов составляла до 15-ти последовательных внедрений индентора с усилием 50 г и шагом 30 мкм. Точность измерения глубины отпечатка равна 0,01 мкм. Испытания проводились по схеме: нагружение индентора/разгрузка с постоянной скоростью приложения нагрузки  $V = 5$  г/с без выдержки.

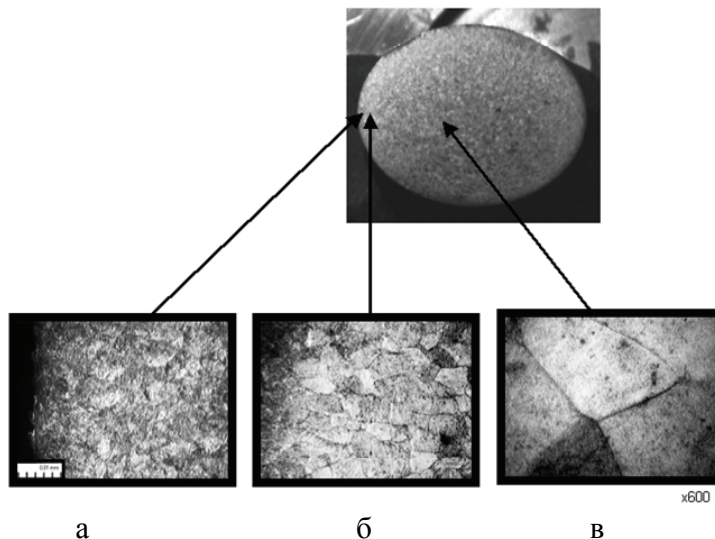


Рис. 8. Структура образца на различных участках: а–на поверхности образца; б–приповерхностный переходной слой; в – центральная недеформированная часть (исходная структура)

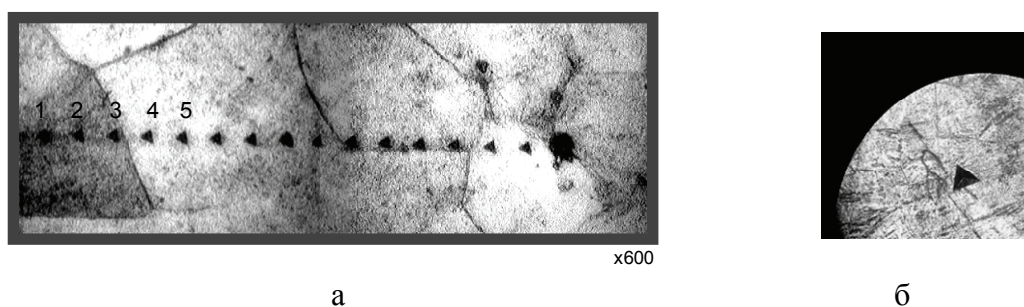


Рис. 9. Серия уколов из 15-ти последовательных внедрений (а) и увеличенный отпечаток от укола индентора Берковича (б)

По результатам индентирования автоматически рассчитывалась величина микротвердости по методу Мейера и Мартела по формулам (1). Распределение микротвердости в приповерхностном слое показано на рис. 10.

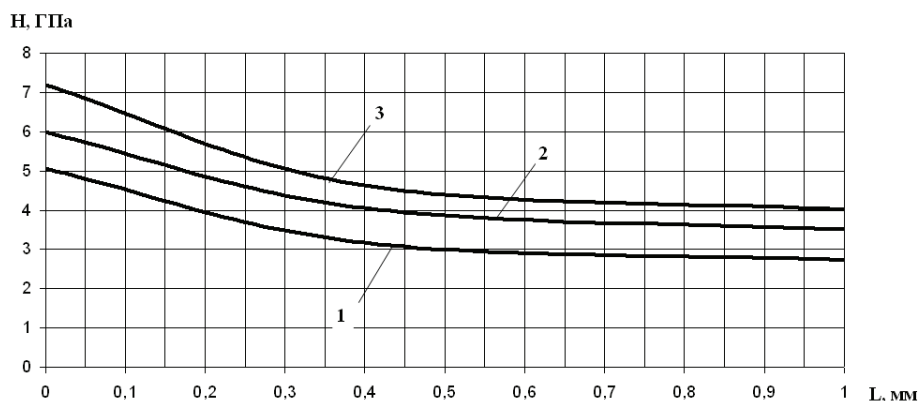


Рис. 10. Результаты замеров микротвердости образцов обработанных ультразвуковым выглаживанием: 1 – по Мейеру; 2 – по Мартелу; 3 – по nМейеру

Установлено, що обробка виглаживаним дозволяє збільшити мікротвердість в приповерхневому шарі в 1,6-2,0 рази, максимальне значення відповідає поверхні зразка.

#### Висновки

1. Показано, що виглаживання з додатковим ультразвуковим навантаженням дозволяє отримати якісну поверхню деталі, крім того, покращити шорхуватість поверхні.

2. Установлено, що при обробці ультразвуковим виглаживаним відбувається зміцнення поверхневого шару деталі і відбувається значуще зменшення розміру зерна, що може призвести до збільшенню втомленої міцності деталей.

3. Показано, що перспективним вважається визначення оптимальних режимів обробки ультразвуковим виглаживаним, а також їх вплив на втомлену міцність деталей.

#### Список літератури

1. Богуслаєв В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологічне забезпечення і прогнозування несучої спроможності деталей ГТД. – К.: Манускрипт, 1993. – 333 с.
2. Іванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа втоми металів – М.: Металургія, 1975, 456 с.
3. Розенберг О.А., Пащенко Е.А., Шейкин С.Е., Ростоккий І.Ю. К вопросу разработки технологических смазок для деформирующего протягивания деталей из сплава ВТ 1-0 // Технологічні системи, 2007, № 2(38) – С. 27-32.
4. Титов А.В., Лабур Т.М., Пузырьов А.Л. Особливості алмазного виглаживання сплава ВТ-23 з використанням твердої смазки // Вестник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ». – 2008. – № 53. – С. 202-207.
5. Титов В.А., Никитенко В.А., Титов А.В., Пливак А.А., Лавриненков А.Д. Особливості алмазного виглаживання сплава ВТ-22 з додатковим ультразвуковим впливом на інструмент // Обробка матеріалів тисненням. – 2009. – № 2 (20).
6. Ігнатович С.Р., Закиєв І.М., Борисов Д.І., Закиєв В.І. Оцінка пошкодженості поверхневого шару при циклічному навантаженні методами наноіндентування і наносклерометрії // Проблеми міцності, 2006, № 4.