

УДК 621.906

В. В. Абрамов, д-р техн. наук, проф., **Ю. П. Ракунов**, канд. техн. наук, доц.
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия
Тел. +7 (910) 4365132; 7 (916) 8107126; E-mail: valabramov@rambler.ru

ВЫГЛАЖИВАНИЕ ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ САПФИРОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

В статье приведены данные о методе финишной отделочной обработки плоских металлических поверхностей при различном уровне термомеханического воздействия на обрабатываемый материал, позволяет получать поверхности с низкой шероховатостью и без инородных включений, с контролируемым и регулируемым уровнем изменения механических свойств на поверхности и с меняющейся активностью металла контактных площадок в процессе выглаживания. Это позволяет совместить процесс выглаживания металлических поверхностей с процессом получения неразъемного прецизионного соединения материалов. Установленные кинетические закономерности изменения высоты микронеровностей дают возможность контролировать и управлять процессом сглаживания микровыступов и завершать его на определенном этапе процесса по необходимости.

Ключевые слова: *Отделка алмазным сглаживанием, эластично-пластическое упрочнение, кинетические кривые, поверхностная твердость и микротвердость, синтетический сапфир*

V. V. Abramov, J. P. Rakunov

SMOOTHING OF FLAT METALLIC SURFACES BY SAPPHIRE TOOLS

The aim of this work is to establish the regularities of the kinetics of the height of microprotrusions of plastic materials under deformation and thermal deformational action by a flat sapphire tool with changes in mechanical properties on the surface and in the contact volume. Kinetic curves of the crushing of microprotrusions of the treatment are shown when smooth metal surfaces are smoothed by sapphire and the mechanical properties (hardness) on the surface and the contact volume of the metal to be treated vary depending on the level of thermal deformation action. The advantages of the process are described; It is shown that this technological process is an important and sufficiently regulated method for regulating, managing and improving the quality of machine parts and equipment. The considered scheme of the smoothing process allows to control the technological process and create the necessary mechanical properties on the surface of the metal.

Keywords: *finishing by diamond smoothing, elastic-plastic strain hardening, kinetic curves, surface hardness and microhardness, synthetic sapphire, directed the formation properties of the treated metal surface.*

1. Введение

Одной из актуальных проблем современного машино- и приборостроения является получение прецизионного разъемного или неразъемного соединения материалов в одноименном, разноименном и разнородном их сочетании, в том числе материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации и физико-механическими свойствами. Современное изготовление деталей машин характеризуется высокими требованиями к их точности и надёжности при ужесточении условий эксплуатации. Создание новых конструкций требует применение новых материалов и технологических процессов (ТП) их обработки. Одним из путей решения этой проблемы является применение технологических методов, основанных на пластическом формоизменении поверхности, например, финишной обработки плоских поверхностей металлов плоским сапфировым инструментом при термомеханическом воздействии [1-3].

С одной стороны, прецизионность соединения предусматривает не только контроль и регулирование деформации микрорельефа в зоне контакта, но также проведение предварительной обработки контактных поверхностей материалов, в том числе методами, основанными на пластическом формоизменении поверхностей путем выглаживания синтетическими сверхтвердыми материалами. С другой стороны, получение неразъемного соединения требует знания кинетики и сущности процессов, протекающих на контактных поверхностях при термомеханическом воздействии на них.

Алмазный инструмент (природный или синтетический) с определённым усилием приводится в соприкосновение с обрабатываемой поверхностью и, перемещаясь относительно неё или сдавливая ее, сглаживает имеющиеся неровности, шероховатость поверхности уменьшается в четыре-восемь раз, микротвёрдость повышается на 30...60% [4-7, 8-11].

Метод выглаживания плоских поверхностей характеризуется достаточно высокой производительностью, универсальностью и возможностью обработки различных поверхностей, простотой технологической наладки и оснастки. Кроме того, предложенная схема ведения ТП позволяет совместить процесс выглаживания с получением прецизионного неразъемного соединения различных комбинаций материалов [2].

В результате применения этого метода повышается несущая способность и износостойкость поверхности, т.к. не наблюдается шаржирования её металлическими и абразивными частицами (что наблюдается при шлифовании); улучшаются эксплуатационные характеристики поверхности за счёт сжимающих напряжений в поверхностном слое металла и его упрочнения, сохранения волокон металла и отсутствия микровпадин заострённой формы, увеличение контактной поверхности (что способствует увеличению и теплоотвода в соединении), в поверхностном слое не возникают высокие температуры [2,3,7,8,13,14].

Технологический процесс финишной обработки посадочных плоских поверхностей выглаживанием является важным методом регулирования, управления и повышения качества деталей машин и приборов [5,10,11,18-23].

2. Методы исследования и привлечение теории

При рассмотренной в работе [8] схеме ведения процесса возникают трудности получения поверхности с шероховатостью $R_z = 0,03$ мкм и даже ее невозможность при обработке плоских металлических поверхностей. Металлическая плоская поверхность высокого класса чистоты с $R_z = 0,03$ мкм и без инородных включений может быть получена за счет пластической деформации микровыступов поверхности путем воздействия на обрабатываемую поверхность плоским сапфировым инструментом с шероховатостью ($R_z = 0,03$ мкм) собственной поверхности [1-3]. Обработку металлической поверхности осуществляют следующим образом: деталь помещают в камеру, в которой создается вакуум или контролируемая атмосфера (в зависимости от природы металла) и нагревают до температуры обработки (температура процесса может находиться в пределах от 0,01 до 0,9 $T_{пл}$ металла). К обрабатываемой поверхности через корундовую пластину прикладывают сжимающее давление. Длительность и характер воздействия давления могут колебаться от нескольких секунд до десятков минут и определяется механико-физико-химическими свойствами обрабатываемого металла. Интенсифицировать процесс финишной отделочной обработки плоских металлических поверхностей можно

путем изменения характера воздействия сжимающего давления (циклирование и скачкообразное изменение его величины) или температуры (термоциклирование) на различных стадиях кинетической кривой выглаживания микровыступов. Так, термоциклирование на этапе установившейся и в конце неустановившейся ползучести или в области фазовых превращений, а также циклическое воздействие давления на этапе неустановившейся ползучести или ступенчатое его увеличение на установившемся этапе приводит к интенсификации процесса выглаживания. В процессе выглаживания происходит формоизменение и изменение высоты микровыступов по схеме (рис.1 и рис. 2 а, б) в соответствии с установленными этапами смятия и повышением точности обработки [1-3]. Наряду с изменением топографии поверхности и механических свойств, пластическая деформация микровыступов изменяет физико-химическую активность обрабатываемой поверхности и позволяет направленно формировать механические свойства обрабатываемой поверхности и в приконтактном объеме.

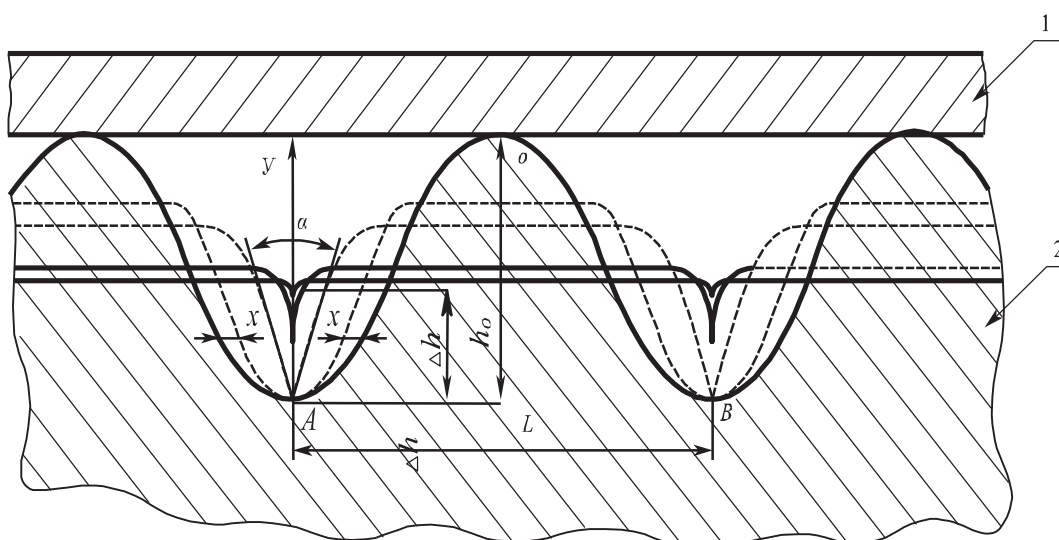


Рисунок 1. Схема «кажущегося» подъема нижней точки основания микровыступов на плоской поверхности при их смятии

Знание кинетических закономерностей сглаживания микровыступов на обрабатываемых поверхностях металлов при чистовой отделочной обработке в условиях принятой схемы ведения процесса, позволяет разрабатывать оптимальную технологию обработки, управлять совмещенными технологическими процессами механической обработки резанием, выглаживания и сварки (сборки) в твердом состоянии композиций разнородных и разноименных материалов.

Важнейшим условием ведения процесса является применение плоского инструмента (выглаживателя), изготовленного из материала, обладающего достаточно высокой твердостью и сопротивляемостью пластическому деформированию при высоких температурах процесса. В качестве материала такого инструмента нами был применен оптически прозрачный, плоско-параллельный диск из синтетического монокристаллического сапфира (корунда) с обработкой поверхности до $R_z = 0,03$ мкм. Выбор сапфира обусловлен тем, что чистая окись алюминия обладает исключительно высокой твердостью (9 ед. по шкале Мооса) и сопротивляемостью пластической деформации (при $T = 1300$ °С и $\sigma_N = 10$ МПа, скорость ползучести сапфира составляет величину $0,5 \times 10^{-23}$ с.

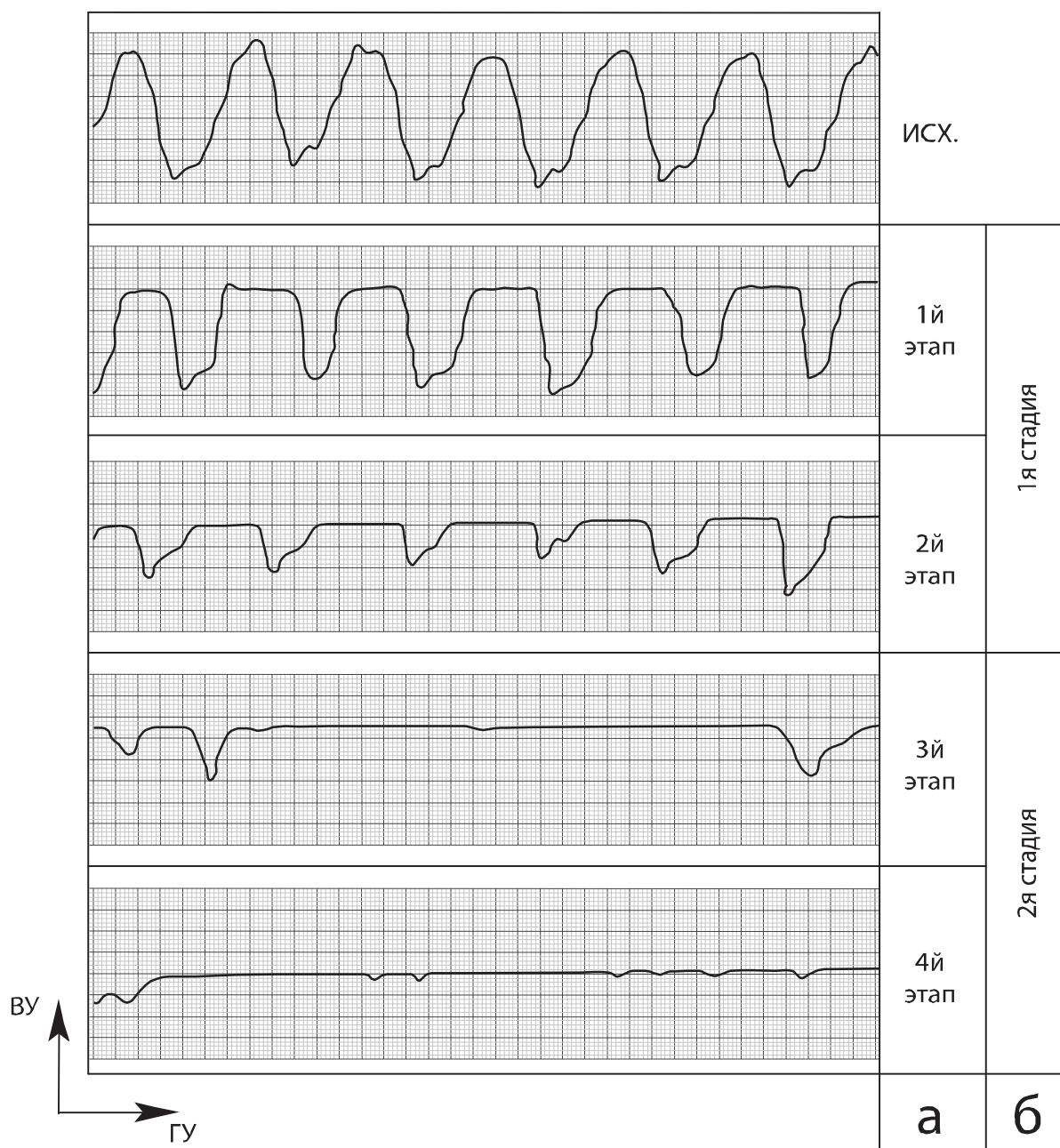
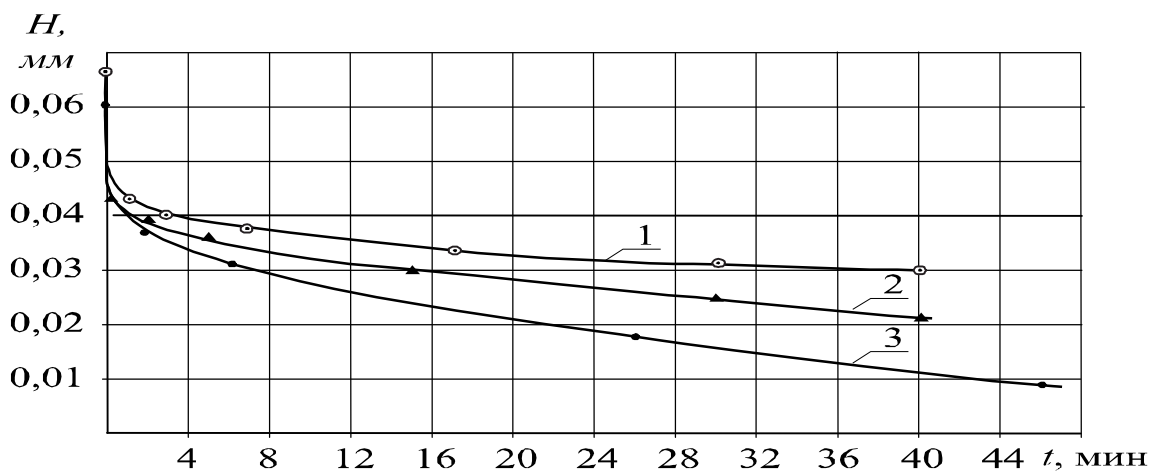


Рисунок 2. Характер профилограмм с контактных поверхностей меди после контактирования с корундом и 4-е этапа смятия микровыступов (а) и объединения в 2-е стадии (б); а) исходный; 1- первый этап смятия; 2 – второй этап смятия; 3 – третий этап смятия; 4 – четвертый этап смятия; б) схематическое изображение смятия микровыступов в 2-е стадии.

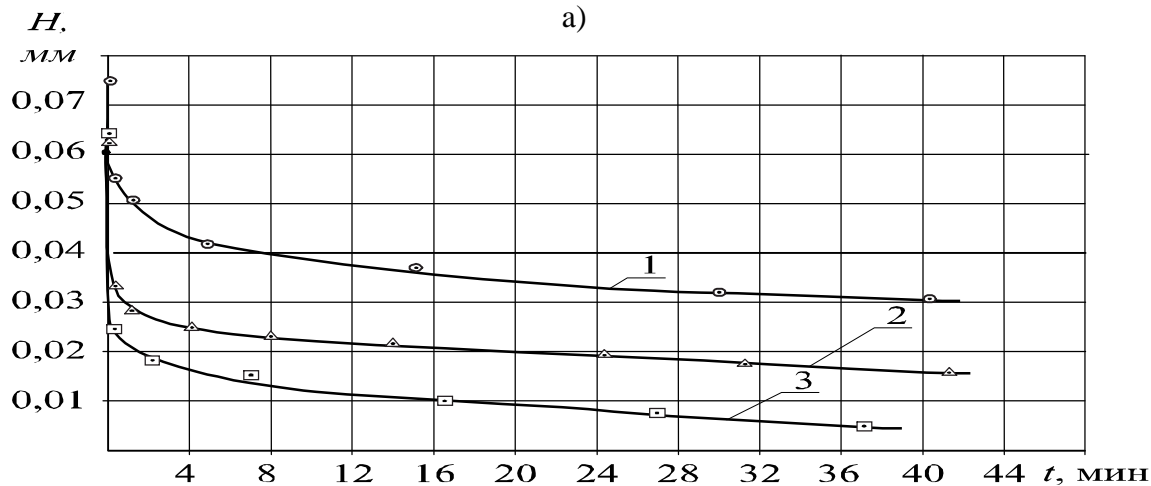
3. Поисковый раздел

Кинетику сглаживания микровыступов изучали путем сопоставления профилограмм, снятых с фиксированного участка поверхности до и после воздействия на нее плоским сапфировым инструментом. Скорость нагрева корунда и обрабатываемого металла, уровень термодформационного воздействия выбирались с учетом различия механических и теплофизических свойств. После заданной выдержки образца под давле-

нием при температуре процесса детали охлаждают и с фиксированного участка вновь снимаю профилограмму. Путем сопоставления профилограмм, полученных до и после обработки поверхности плоским сапфировым инструментом, судят об изменении высоты H микровыступов и величине контактных площадок на вершинах микровыступов, образующихся за счет их смятия. На рис. (3 а, б) приведены кривые изменения высоты микровыступов меди МБ, выполненных для интервала температур 700...900 °С и давления сжатия: 5,10,15 и 20 МПа; предварительная обработка поверхности – строгание с $R_z = 40...80$ мкм.



а)



б)

Рисунок 3. Кинетика изменения высоты (H , мкм) микровыступов меди МБ при выглаживании сапфиром. Предварительная обработка поверхности – строгание.
 а - $\sigma_N = 5$ МПа; б - $\sigma_N = 10$ МПа; а, б – кривые: 1 – 973 К; 2 – 1073 К; 3 – 1173 К.

На кинетических кривых можно отметить три стадии.

Первая стадия (период приложения давления, равный 10 с и принятый за ноль отсчета времени) характеризует активную деформацию зерна микровыступа, которая сопровождается развитием тонких линий скольжения, однородно расположенных на поверхности образующейся контактной площадки. В этот период времени скольжение развивается только по одной системе плоскостей; под действием приложенных напряжений дислокации беспрепятственно перемещаются и выходят на поверхность кри-

сталла, образуя деформационный микровыступ (ступеньку), который можно рассматривать как активный центр контактного взаимодействия. Степень упрочнения на этой стадии процесса достаточно мала (при низких значениях давления – см. рис. 4 кривые 1 и 2); увеличение давления приводит к заметному разупрочнению – кривые 3-9 (рис.4).

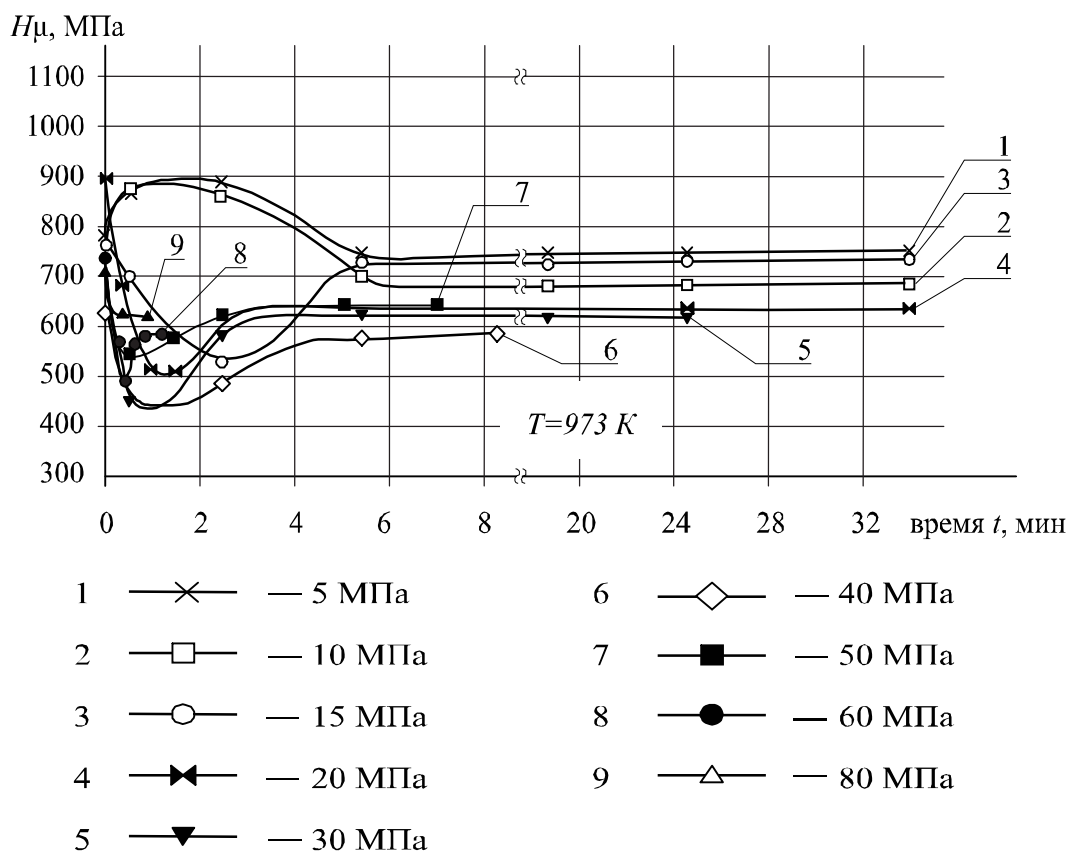


Рисунок 4. Характер изменения микротвердости на поверхности контактных площадок микровыступов меди при чистой отделочной обработке корундом. T = 973 K.

Кривые: 1 - $\sigma_N = 5$ МПа; 2 – 10 МПа; 3 – 15 МПа; 4 – 20 МПа; 5 – 30 МПа; 6 - 40 МПа; 7 – 50 МПа; 8 – 60 МПа; 9 – 80 МПа.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты экспериментов показывают, что наиболее интенсивно уменьшение высоты микровыступов происходит именно в первые моменты нагружения и может достигать 50...70 % от исходного значения высоты и уровня термомодеформационного воздействия.

Вторая стадия сглаживания микровыступов приблизительно соответствует этапу неустановившейся ползучести, характеризующаяся непрерывно уменьшающейся скоростью. В этот период времени частота и плотность выхода дислокаций на поверхность зерна микровыступа снижается, взаимно конкурирующие процессы разупрочнения и упрочнения приходят в равновесие и стабилизируются, что и отображается на кинетических кривых изменения твердости на поверхности контактных площадок микровыступов меди (рис. 4, участок времени после 4-х минут). Аналогичный характер имеет и вид кинетических кривых образования площади контактных площадок, образующихся при смятии за счет пластической деформации микровыступов. Полученные экспери-

ментальные данные говорят о том, что в процессе сглаживания микровыступов происходит смена механизмов, контролирующих пластическую деформацию приповерхностных объемов металла, которая, в свою очередь, приводит к изменению механических свойств на поверхности (твердость) и ее активности, приводящей к схватыванию контактирующих поверхностей.

Третья стадия процесса сглаживания микровыступов соответствует этапу установившейся ползучести и характеризуется постоянной скоростью выглаживания. Как следует из полученных экспериментальных данных, полученных в широком интервале температур и давлений, температура оказывает несколько большее влияние на интенсивность сглаживания чем давление, что хорошо согласуется с положением о пластической деформации как о термически активируемом процессе. Анализ полученных данных показывает, что влияние T и P на скорость выглаживания существенно возрастает с ростом другого влияющего фактора – P или, соответственно, T . Показатель степенной зависимости $S(P)$ – скорости образования контакта при $T = \text{const}$, определенный во всем интервале температур, меняет свои значения от 1,2 при $T = 473$ К, до 2,6 и 2,8 при $T = 873$ и 973 К, соответственно, что свидетельствует о смене механизма, контролирующую пластическую деформацию микровыступов меди в различном температурном диапазоне. Дополнительным подтверждением этого служит бимодальность функции $S(P)$ в промежуточном интервале температур (573...673 К). Можно отметить увеличение длительности третьей стадии сглаживания с понижением температуры и давления. Дальнейшее увеличение длительности процесса смятия микровыступов после образования 60% площади контакта приводит к свариванию микровыступов боковыми образующими между собой с образованием макропятен контакта и этот процесс распространяется по всей обрабатываемой поверхности. Это, в свою очередь, приводит к изменению физико-химической активности атомов контактных поверхностей и схватыванию.

4. Заключение

Таким образом, рассмотренный метод финишной отделочной обработки плоских металлических поверхностей при различном уровне термомеханического воздействия на обрабатываемый материал, позволяет получать поверхности с шероховатостью $R_z = 0,03$ мкм и без инородных включений, с контролируемым и регулируемым уровнем изменения механических свойств на поверхности и с меняющейся активностью металла контактных площадок в процессе выглаживания. Это позволяет совместить процесс выглаживания металлических поверхностей с процессом получения неразъемного прецизионного соединения материалов. Установленные кинетические закономерности изменения высоты микронеровностей дают возможность контролировать и управлять процессом сглаживания микровыступов и завершать его на определенном этапе процесса по необходимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. № 350640 с приоритетом. Способ отделочной обработки металлических поверхностей / В. В. Абрамов и др.; опубл. 28.12.1970.
2. Абрамов, В. В. Кинетика взаимодействия разнородных материалов в твердом состоянии и разработка совмещенного технологического процесса выглаживания и получения неразъемного соединения при производстве приборов авиационной и электронной техники: автореф. дис... д-ра техн. наук / В. В. Абрамов – М., МАТИ им. К.Э. Циолковского, 1990, – 38 с.

3. Абрамов, В. В. Выглаживание сапфировым инструментом плоских мембран датчиков давления / В. В. Абрамов, В. А. Ефимов // Промышленность медицинской техники – 1975. – №7. – С. 3-15.
4. Торбило, В. М. Алмазное выглаживание / В. М. Торбило – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
5. Хрульков, В. А. Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении / В. А. Хрульков, А. Я. Головань, А. И. Федотов. – М.: Машиностроение, 1977. – 223 с.
6. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвёрдыми и керамическими материалами, и их применение: Справочник / В. П. Жедь, Г. В. Боровских, Я. А. Музыкант, Г. М. Ипполитов. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
7. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / А. А. Панов, В. В. Аникин, Н. Г. Бойм и др.; под общ. ред. А. А. Панова. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.
8. Ракунов, Ю. П. Оптимизация влияния технологических факторов выглаживания на качество поверхностей деталей машин: Материалы 14-й Международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесение покрытий и ремонта» в 2 ч. Часть 1 / Ю. П. Ракунов, В. А. Хрульков.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 396 с.
9. Ракунов, Ю. П. Управление и регулирование «твёрдого» течения композитами для обеспечения качества обработки с учётом жёсткости технологической системы. Справочник / Ю. П. Ракунов, Б. И. Воробьев // Инженерный журнал. – 2013. – № 11.
10. Зеликсон, Г. А. Износ и стойкость алмазных выглаживателей.: В сб.: Алмазы и алмазный инструмент / Г. А. Зеликсон, В. Г. Улегин // Труды ВНИИАЛМАЗа – 1973. – №1. – С. 24-34.
11. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
12. Торбило, В. М. Расчёт стойкости алмазных выглаживателей.: В сб.: Алмазы и сверхтвёрдые материалы / В. М. Торбило. – 1981. – № 2. – С. 9-12.
13. Одинцов, Л. Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием / Л. Г. Одинцов – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
14. Alexander H. A. Phys. Status solidi. – 1968. – V. 26. – N2. – P. 725-741.
15. Alexander H. A. Phys. Status solidi. – 1968. – V. 27. – N1. – P. 391-412.
16. Tabor D., Wilson J. M., Bastow T. I. – Surfase Sci. – 1971. – V. 26. – N2. – P. 471-476.
17. Екобори, Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. Пер. с англ. / Т. Екобори. – М.: Металлургия, 1971. – 264 с.
18. Goodman L. Applied Mechanics Transaction. September. – 1962. – P. 74.
19. May C. A., Ashbee K. H. Micron. – 1969. – V.1. – P. 62.
20. Rogers W., Baker G. S., Cibbs P. In: “Mechanical Properties of Engineering Ceramics” N.Y., Interscience Publ. Inc. – 1961. – P. 301.
21. Chang R. J. Appl. Phys. – 1960. – V. 31. – P. 484.
22. Conrad H. Wielding and Flow of Sapphire Crystals. US Atom. Energy Commiss., NAA SR 6543. – 1961.
23. Conrad H. J. Amer. Ceram. Society. – 1965. – V. 48. – P. 195.

Поступила в редколлегию 10.05.2017 г.