

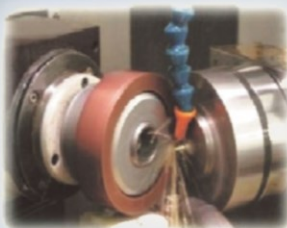
НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

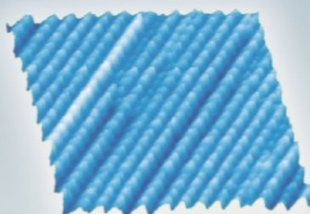
5 (155)

2024

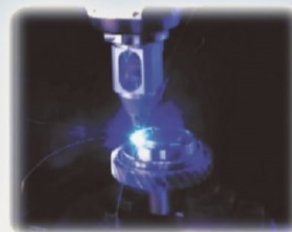
ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ



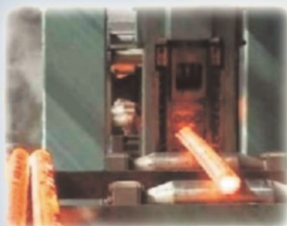
ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



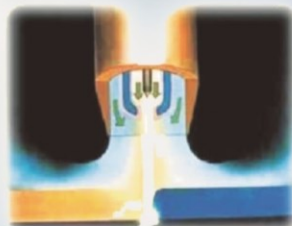
ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ



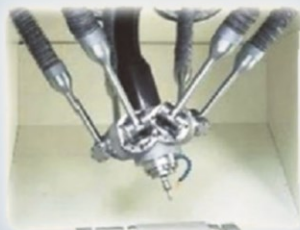
НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ



НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ



ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 5 (155)

2024

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г. (г. Москва)

Зам. главного редактора

д.т.н., доц. ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

д.т.н., чл.-корр. РАН ПРИХОДЬКО В.М.
(г. Москва)

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г. (г. Москва)

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БУЯНОВСКИЙ И.А. (г. Москва)

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

д.т.н., проф. ГУСЕЙНОВ Г.А. (г. Баку,
Азербайджан)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. КАВАЛЕК А.А. (г. Ченстохова,
Польша)

д.н., магистр наук КРЕХЕЛЬ Р. (г. Капушан,
Словакия)

д.т.н., проф. КУКСЁНОВА Л.И. (г. Москва)

д.т.н., проф. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

д.т.н., акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк)

д.т.н., акад. НАН Беларуси МЫШКИН Н.К.
(г. Гомель, Беларусь)

д.т.н., проф. ОВЧИННИКОВ В.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПЕТРОВА Л.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. ФЕДОНИН О.Н. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

д.т.н., доц. ШОХИЁН А.Н. (г. Куляб, Таджикистан)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить по интернет-
каталогу "Пресса по подписке".

Подписной индекс: **Э79195**.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: editntm@yandex.ru

<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
26 апреля 2019 года
рег. номер ПИ № **ФС77-75524**

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Миненко Г.Н. Механизм влияния электрического поля на процесс
модифицирования серого чугуна. 3

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Чудин В.Н., Пасынков А.А. Изотермическое прессование в конической
матрице релаксирующего материала. 9

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Маликов А.А., Сидоркин А.В., Артамонов В.Д., Ковалев Ю.В.
Влияние износа инструмента в процессе физического моделирования
шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес
на параметр шероховатости. 14

Базров Б.М. Анализ служебного назначения металлорежущих станков. 25

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ТРЕНИЕ И ИЗНОС ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Щербаков Ю.И. Сравнение
трибологических свойств алмазоподобного покрытия в паре
со сталью / керамикой при сухом трении и граничной смазке. 31

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Польский Е.А., Абрамов Р.В. Технологическое обеспечение
эксплуатационных свойств сопрягаемых поверхностей элементов
сборной формообразующей оснастки с учетом установленной
долговечности пресс-форм. 40

**Журнал входит в перечень изданий ВАК, утвержденных для соискателей
ученых степеней по научным специальностям: 2.5.3 - Трение и износ в
машинах; 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки; 2.5.6 - Технология машиностроения; 2.5.7 -
Технология и машины обработки давлением; 2.5.8 - Сварка, родственные
процессы и технологии; 2.6.17 - Материаловедение (по отраслям)
(технические науки).**

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,
публикуемых в журнале «Наукоёмкие технологии в машиностроении»,
допускаются со ссылкой на источник информации и только
с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 5 (155)

2024

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s., prof. SUSLOV A.G. (Moscow)

Deputy chief editor

d.en.s., assoc. prof. SHALYGIN M.G. (Bryansk)

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIKHODKO V.M. (Moscow)

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGORYANTS A.G. (Moscow)

Editorial Committee:

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BUYANOVSKII I.A. (Moscow)

PhD., Dr. Engineer WALDENMAIER T.
(Stuttgart, Germany)

d.en.s., prof. HUSEYNOV H.A. (Baku,
Azerbaijan)

d.en.s., prof. DEMIN V.A. (Moscow)

d.en.s., prof. KAWALEK A.A. (Czestochowa,
Poland)

PhD., Msc. KREHEL R. (Kapusany, Slovakia)

d.en.s., prof. KUKSENOVA L.I. (Moscow)

d.en.s., prof. LARIN S.N. (Tula)

d.en.s., Acad. RASLYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm)

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIKHAILOV A.N. (Donetsk)

d.en.s., MYSHKIN N.K. Acad. of NAS Belarus
(Gomel, Belarus)

d.en.s., prof. OVCHINNIKOV V.V. (Moscow)

d.en.s., prof. PETROVA L.G. (Moscow)

d.en.s., prof. SMOLENTSEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. FEDONIN O.N. (Bryansk)

d.en.s., prof. KHEIFETZ M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. TCHIGIR INSKY Ju.L. (Volgograd)

d.en.s., assoc. prof. SHOHYON A.N. (Kulob,
Tajikistan)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

The magazine is distributed by subscription,
which can be issued through the online catalog
"Subscription Press".
Subscription index: **379195**.

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.
E-mail: editntm@yandex.ru
<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

**The journal is registered by the Federal
service for supervision of communications,
information technologies and mass
communications (Roskomnadzor)
26.04.2019 registration number
print publication № FS77-75524**

CONTENTS

MATERIALS SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Minenko G.N. Mechanism of the electric field effect on the process of grey
cast iron inoculation 3

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF METAL PROCESSING BY PRESSURE

Chudin V.N., Pasynkov A.A. Isothermal extrusion in a cone-type matrix
of a relaxing material 9

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Malikov A.A., Sidorkin A.V., Artamonov V.D., Kovalev Yu.V.
Tool degradation effect on roughness factor in the process of physical
modeling of cylindrical gear shaving and rolling 14

Bazrov B.M. Analysis of metal-cutting machines intended service 25

SURFACE LAYER QUALITY, CONTACT INTERACTION, FRICTION AND WEAR OF MACHINE PARTS

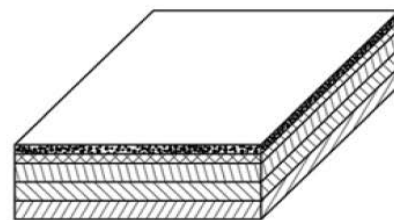
Buyanovsky I.A., Samusenko V.D., Shcherbakov Yu.I. Comparison of
tribological properties of a DLC jointly with steel / ceramics
under dry friction and boundary lubrication 31

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS

Polsky E.A., Abramov R.V. Engineering support of mating surfaces
operational properties in the compound forming tool elements
with regard to specified pressmold life 40

The journal is included in the list of publications of the HAC approved for applicants of
academic degrees in scientific specialties: 2.5.3 - Friction and wear in machines;
2.5.5 - Technology and equipment of mechanical and physico-technical processing;
2.5.6 - Mechanical engineering technology; 2.5.7 - Technology and pressure treatment
machines; 2.5.8 - Welding, related processes and technologies; 2.6.17 - Materials
Science (by industry) (technical sciences).

**Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»**



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №5 (155). С.3-8.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №5 (155). P.3-8.

Научная статья

УДК 621.74.628:669.131.6

doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-8

Механизм влияния электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна

Георгий Николаевич Миненко, к.т.н.

Ресурсный центр отраслевого машиностроения Московской области,

Люберцы, Россия

minenko1946@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2839-2045>

Аннотация. Представлена схема экспериментальной установки для измерения электрического сопротивления расплава серого чугуна, в которой использован измерительный прибор на основе двойного мостового устройства Томпсона. Показано, что величина удельного электрического сопротивления серого чугуна изменяется в зависимости от марки применяемого модификатора. Приведены опытные данные по отличию величин удельного электрического сопротивления для различных модификаторов серого чугуна. Также даны изменения значений электросопротивления под влиянием обработки электрическим полем расплава модифицированного чугуна. Сопоставление величин прочности серого чугуна с его значениями удельного электрического сопротивления расплава чугуна после воздействия электрического поля показали их одновременное изменение. Показано падение значений удельного электросопротивления жидкого чугуна от воздействия электрического поля, и оно соответствует приращению прочности модифицированного серого чугуна. Эффективность воздействия электрического поля на процесс модифицирования чугуна определяется термической ионизацией химических элементов входящих в состав модификатора. Показано максимальное увеличение этих параметров после обработки электрическим полем при использовании модификатора ФС75. Описан механизм влияния электрического поля на процесс кристаллизации чугуна для процесса модифицирования ФС75, содержащего в своём составе 75 % кремния. Приведена зависимость эффективности обработки электрическим полем от состава модификатора для серого чугуна. Описана физическая модель воздействия электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна. Указана возможность посредством обработки электрическим полем влиять на гидродинамическую обстановку в расплаве серого чугуна и изменять скорость растворения частиц модификаторов.

Ключевые слова: модифицирование серого чугуна, процесс кристаллизации, удельное электрическое сопротивление, обработка электрическим полем, прочность серого чугуна, механизм влияния электрического поля

Для цитирования: Миненко Г.Н. Механизм влияния электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-8

Mechanism of the electric field effect on the process of grey cast iron inoculation

Georgy N. Minenko, Ph.D. Eng.
Resource Center for Industrial Engineering of the Moscow region,
Lyubertsy, Russia
minenko1946@mail.ru

Abstract. A diagram of an experimental installation for measuring the electrical resistance of a gray cast iron melt is presented, where a gauge based on a Kelvin double bridge is used. It is shown that the value of the specific electrical resistance of gray cast iron varies depending on the type of conditioning agent. Experimental data on the difference in specific resistivity values for various gray cast iron nucleating agents are presented. Changes in the values of electrical resistance under the influence of electric field treatment of inoculated cast iron melt are also given. Comparison of the strength values of gray cast iron with its values of the electrical resistivity of the cast iron melt after the electrical field exposure showed their simultaneous change. The decrease in the values of the electrical resistance of hot iron due to the electric field exposure is shown and it corresponds to an increment in the strength of inoculated cast iron. The effectiveness of the electric field exposure on the process of inoculation is determined by thermal ionization of the chemical elements included in the conditioning agent. The maximum increase of these parameters after electric field exposure when using FS75 nucleating agent is shown. The mechanism of the influence of an electric field on the cast iron solidification for the inoculation process of FS75, containing 75 % silicon in its composition, is described. The dependence of the efficiency of electric field exposure on the composition of the nucleating agent for gray cast iron is shown. A physical model of the effect of an electric field exposure on the process of cast iron inoculation is found. The possibility of influencing the hydrodynamic situation in the melt of gray cast iron and changing the rate of dissolution of nucleating agent particles by means of electric field exposure is given.

Keywords: cast iron inoculation, process of solidification, electrical resistance, electric field exposure, gray cast iron strength, mechanism of electric field effect.

For citation: Minenko G.N. Mechanism of the electric field effect on the process of grey cast iron inoculation / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-8

Одним из перспективных способов повышения механических свойств литейных сплавов является воздействие электрического поля на металлический расплав [1 – 3]. Также своё применение этот способ нашёл при модифицировании сплавов [4, 5]. Однако для оптимизации использования этого метода в литейном производстве следует, основываясь на физической модели, определить механизм влияния электрического поля с учётом специфики протекания данного способа воздействия на расплав в условиях процесса модифицирования серого чугуна.

Для определения особенностей процесса воздействия электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна

была использована экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1.

В состав данной установки входят: 1 – огнеупорная емкость объемом 50 кг; 2 – печь сопротивления для подогрева расплава серого чугуна; 3 – измерительные электроды измерительной схемы (ИС) соединённых с двойной мостовой схемой Томпсона [6]; 4 – электроды подачи постоянного напряжения со звукового генератора ЗГ-17 (ИПН) и напряжения поля обработки расплава (ИН); 5 – устройство подъема и погружения измерительной ячейки в расплав серого чугуна; М – приспособление ввода модификатора в расплав чугуна.

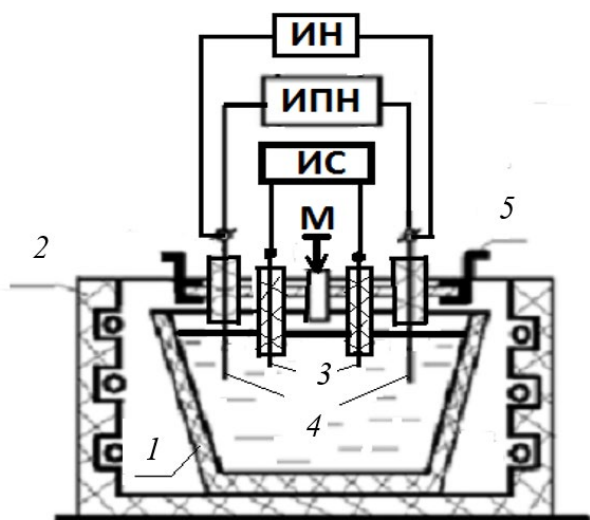


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения влияния электрического поля на процесс модифицирования серого чугуна

Fig. 1. Scheme of an experimental installation for determining the effect of the electric field effect on the process of grey cast iron inoculation

В электрической схеме предусмотрено автоматическое отключение источника напряжения (ИН) при работе звукового генератора (ИПН), что исключает одновременное подключение к расплаву чугуна ИН и ИПН через электроды 4 (см. рис. 1). Температура ввода модификатора, которая составляла 1380 °С, измерялась термопарой ВР-5/10.

Результаты определения величин удельного электросопротивления R расплава модифицированного серого чугуна показали их существенные изменения. Так после процесса модифицирования чугуна ФС75 (рис. 2, поз. 1) и сразу после обработки электрическим полем в процессе модифицирования (рис. 2, поз. 2) показали, в среднем, разность в 52 мкОм·см.

Различия средних величин R для процесса модифицирования Селикомишметаллом -СММ (рис. 2, поз. 3 и поз. 4) составили 37 мкОм·см и при модифицировании СК25 (рис. 2, поз. 5 и поз. 6) 41 мкОм·см. Можно предположить, что наименьшую величину R расплав обработанного, модифицированного

ФС75 серого чугуна (см. рис. 2) имеет за счёт увеличения количества токоносителей (электронов и ионов) после растворения частиц модификатора и образованием большого числа центров кристаллизации в расплаве чугуна.

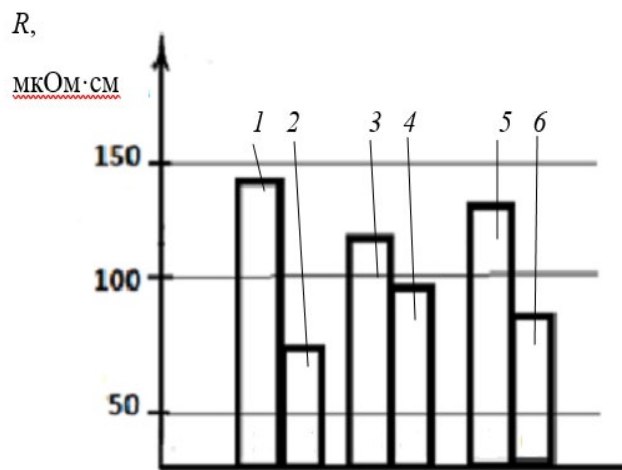


Рис. 2. Изменения величины удельного электрического сопротивления R расплава модифицированного серого чугуна после обработки электрическим полем

Fig. 2. Change in the value of the electrical resistance R of the melt of inoculated cast iron after treatment with an electric field exposure

Опытные данные по определению прочностных свойств модифицированного серого чугуна марки ФС75 (75 % Si; 1 % Ca; 2 % Al), СММ (55 % Si; 3 % Ca; 5 % Al) и СК25 (45 % Si; 30 % Ca; 1 % Al) с вводом модификатора 0,5 % от массы сплава [7] показали, что для всех процессов модифицирования (рис. 3) происходит существенное увеличение прочностных свойств серого чугуна. На рис. 3 нечётными цифрами обозначены результаты воздействия электрического поля на процессы модифицирования чугуна ФС75, СММ и СК25. Над столбцами диаграммы с чётными цифрами приведены данные для этих процессов модифицирования серого чугуна без обработки электрическим полем.

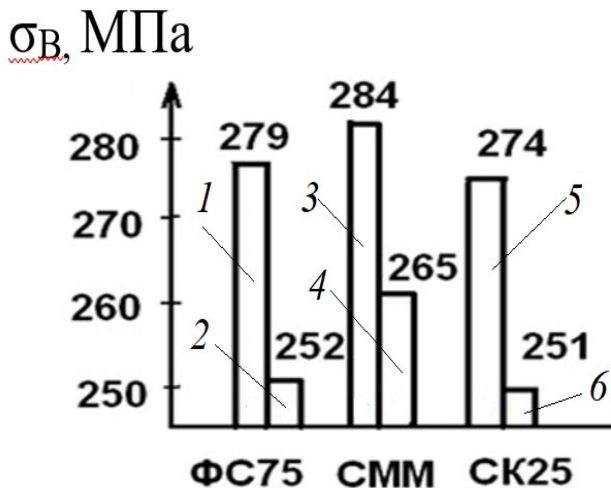


Рис. 3. Изменение прочностных свойств модифицированного серого чугуна под влиянием электрического поля

Fig. 3. Change in the strength properties of inoculated cast iron under electric field effect

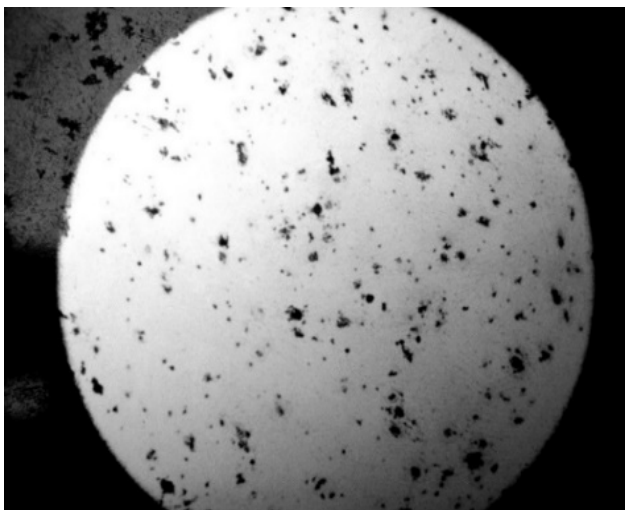


Рис. 4. Образец исходного модифицированного FC75 серого чугуна (не травлено, ×100)

Fig. 4. Sample of the original inoculated FS75 cast iron (not etched, × 100)

Металлографические исследования выявили изменение количества включений графита в структуре серого чугуна под влиянием электрического поля, так на рис. 4 представлена структура чугуна после модифицирования после FC75.

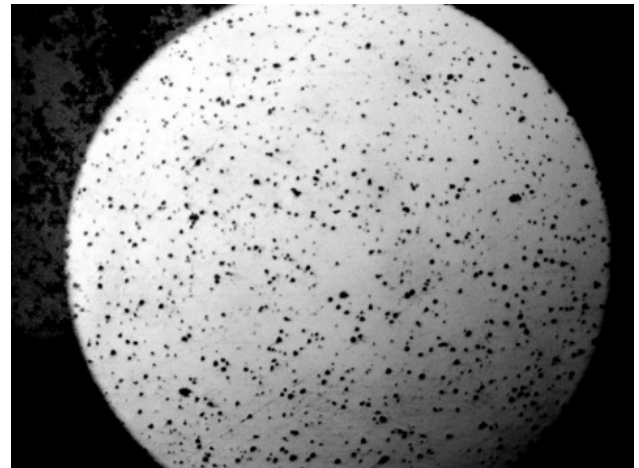


Рис. 5. Образец обработанного электрическим полем модифицированного FC75 серого чугуна (не травлено, ×100)

Fig. 5. Sample of inoculated FS75 cast iron treated with an electric field (not etched, ×100)

На рис. 5 показана структура чугуна после модифицирования FC75 с обработкой электрическим полем. Из сопоставления данных структур следует, что воздействие электрического поля существенно влияет на количество включений графита и делает структуру обработанного модифицированного более упрочнённой прочной по сравнению с исходным модифицированным чугуном. Рост прочностных свойств обработанного сплава вызван позитивными изменениями в структуре чугуна за счёт более дисперсных графитовых включений, которые в меньшей степени подрезают металлическую основу сплава. Это объясняется тем, что при вводе частиц модификатора (FC75 с 75 % Si) в металлический расплав происходит их растворение с нарушением ковалентных связей в Si и возникает увеличение количества свободных токоносителей [8, 9]. Наложение на расплав электрического поля приводит к ускорению движения этих токоносителей, которые передают свою кинетическую энергию центрам кристаллизации сплава увеличивая их энергию и тем самым снижают критический размер зародышей кристаллов [10, 11]. Такие условия роста кристаллов вызывают увеличение количества кристаллов

графита в единице объёма обработанного серого чугуна, что упрочняет его структуру и повышает прочностные свойства.

Наибольшее повышение прочностных свойств и приращение величины электросопротивления расплава чугуна наблюдается после обработки электрическим полем при использовании ФС75 (см. рис. 2 и рис. 3). Можно предположить некоторое снижение прочностных свойств чугуна при вводе СК25 и СММ, по сравнению с ФС75, происходит за счёт меньшей степени термической ионизации химических элементов, входящих в состав этих модификаторов [8, 12]. Это уменьшает количество свободных токоносителей в расплаве и снижает эффективность воздействия электрического поля на процесс кристаллизации серого чугуна.

Также в межэлектродном пространстве под влиянием электрического поля возникают термоэлектрические явления и выделяется джоулево тепло, которое повышает интенсивность конвективных потоков в металлическом расплаве и изменяет гидродинамическую обстановку [13, 14]. Это позитивно влияет на скорость растворения частиц модификаторов в жидком чугуне и повышает степень усвоения модификатора металлическим расплавом, что воздействует на рост эффективности влияния модификатора на структуру сплава [15, 16].

Заключение

Таким образом, опытные данные по определению удельного электросопротивления жидкого чугуна выявили зависимость их величин от химсостава используемых модификаторов и влияние на них электрофизического воздействия. Результаты по измерению прочности модифицированного серого чугуна показали позитивное влияния обработки расплава чугуна электрическим полем. Падение значений удельного электросопротивления после воздействия электрическим полем на жидкий чугун соответствующему приращению прочности модифицированного серого

чугуна. Воздействие электрического поля на процесс модифицирования чугуна определяется термической ионизацией химических элементов входящих в состав модификатора. Обработка электрическим полем влияет на гидродинамическую обстановку в расплаве серого чугуна изменяющую скорость растворения частиц модификаторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Вертман А.А., Самарин А.М.** Свойства расплавов железа. М.: «Наука», 1969. 280 с.
2. **Чернышов И.А.** Электромагнитное воздействие на металлические расплавы. М.: Metallurgizdat, 1963. 246 с.
3. **Верте Л.А.** Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла. Л., Metallurgiya, 1967. 206 с.
4. **Миненко Г.Н.** Воздействие физических полей на процессы внепечной обработки литейных сплавов. Учебное пособие. М.: Издательство «Спутник +», 2012. 64 с.
5. **Миненко Г.Н.** О воздействии обработки электротоком на процесс модифицирования Fe-C сплавов // Литейное производство. 2011. № 5. С. 6–8.
6. **Филиппов С.И., Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Крашенинников М.Г.** Физико-химические методы исследования металлургических процессов М.: Metallurgiya, 1968, 551 с.
7. **Справочник по чугунному литью** / Под ред. Н.Г. Гиршовича. Изд. 3-е. Л.: Машиностроение, 1978. 758 с.
8. **Белашенко Д.К.** Явления переноса в жидких металлах и полупроводниках. М.: Атомиздат, 1970. 252 с.
9. **Регель А.Р., Глазов В.М.** Физические свойства электронных расплавов. М. «Наука», 1980. 296 с.
10. **Куманин И.Б.** Вопросы теории литейных процессов. Формирование отливок в процессе затвердевания и охлаждения сплава. М., Машиностроение, 1976. 216 с.
11. **Ершов Г.С., Черняков В.А.** Строение и свойства жидких и твёрдых металлов. М.: Metallurgiya. 1978. 248 с.
12. **Жуховицкий А.А., Белашенко Д.К., Бокштейн Б.С., Григорян В.А., Григорьев Г.А., Гугля В.Г.** Физико-химические основы металлургических процессов. М.: Metallurgiya, 1973. 392 с.
13. **Гельфгат Г.М., Лиелаусис О.А., Щербинин Э.В.** Жидкий металл под воздействием электромагнитных сил. Рига: «Зинанте», 1976. 248 с.
14. **Кирко И.М.** Жидкий металл в электромагнитном поле. М.: Энергия, 1964. 237 с.

15. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. Краткий курс физической химии. М.: Металлургия, 1979. 368 с.

16. Миненко Г.Н., Головоких А.С. Особенности процесса воздействия электрического тока на металлический расплав // Литейщик России. 2011. № 7. С. 29–30.

REFERENCES

1. Vertman A.A., Samarin A.M. Properties of iron melts. Moscow.: Nauka, 1969, 280 p.

2. Chernyshov I.A. Electromagnetic effect on metal melts. Moscow: Metallurgizdat, 1963. 246 p.

3. Verte L.A. Electromagnetic casting and treatment of liquid metal. Leningrad: Metalurgia, 1967, 206 p.

4. Minenko G.N. The effect of physical fields on the processes of secondary metallurgy process of casting alloys. Textbook. Moscow: Publishing house «Sputnik +», 2012. 64 p.

5. Minenko G.N. Influence of processing of melt by electric field on processes of modifying of Fe-C alloys // Foundry practices, 2011, no. 5, pp. 6–8.

6. Filippov S.I., Arsentiev P.P., Yakovlev V.V., Krashennnikov M.G. Physico-chemical methods of research of metallurgical processes. Moscow: Metallurgia, 1968, 551 p.

7. Iron Casting Guide / edited by N.G. Girshovich, 3rd edition. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 758 p.

8. Belashchenko D.K. Transfer phenomena in liquid metals and semiconductors. Moscow: Atomizdat, 1970, 252 p.

9. Regel A.R., Glazov V.M. Physical properties of electronic melts. Moscow: Nauka, 1980, 296 p.

10. Kumanin I.B. Issues of theory of casting processes the formation of castings in the process of solidification and cooling of the alloy. Moscow Mashinostroenie, 1976, 216 p.

11. Ershov G.S., Chernyakov V.A. Structure and properties of liquid and solid metals. Moscow: Metallurgia, 1978, 248 p.

12. Zhukhovitsky A.A., Belashchenko D.K., Bokshtein B.S., Grigoryan V.A., Grigoriev G.A., Guglya V.G. Physical and chemical bases of metallurgical processes. Moscow: Metallurgia, 1973, 392 p.

13. Gelfgat G.M., Lielausis O.A., Shcherbinin E.V. Liquid metal under the influence of electromagnetic forces. Riga: Zinante, 1976, 248 p.

14. Kirko I.M. Liquid metal in an electromagnetic field. Moscow: Energiya, 1964, 237 p.

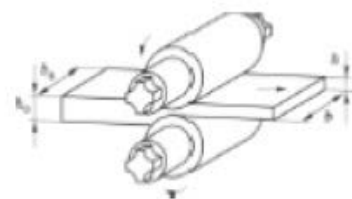
15. Zhukhovitsky A.A., Shvartsman L.A. A short course in physical chemistry. Moscow: Metallurgia, 1979, 368 p.

16. Minenko G.N., Golovkin A.S. Characteristics of the electric current action on a metal melt // Smelter of Russia, 2011, no. 7, pp. 29–30.

Статья поступила в редакцию 21.03.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 21.03.2024; approved after reviewing 11.03.2024; assepted for publication 20.03.2024.





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №5 (155). С.9-13.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №10 (155). P. 9-13.

Научная статья
УДК 621.774.4;374.001.573
doi: 10.30987/2223-4608-2024-9-13

Изотермическое прессование в конической матрице релаксирующего материала

Владимир Николаевич Чудин¹, Д.Т.Н.
Андрей Александрович Пасынков², К.Т.Н.
^{1,2} Тульский государственный университет, Тула, Россия
^{1,2} mpf-tula@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8757-9411>

Аннотация. Предложены соотношения для расчета деформационного и силового режимов изотермического прессования заготовок из высокопрочных металлических сплавов. При изотермическом деформировании происходит упрочнение материала и разупрочнение, что связано с проявлением вязких свойств материала (ползучестью). В этой связи принято состояние вязкопластичности. Деформационное состояние сопровождается релаксацией напряжений, которое тем больше, чем меньше скорость (больше длительность) операции. На основе механики деформирования зависимость режимов прессования (деформации, сила, повреждаемость материала заготовки) выражается аналитическими соотношениями. Силовой режим определяется с помощью энергетического метода, связанного с мощностями внешних и внутренних сил. Баланс мощностей этих сил приводит к оценке давления изотермического прессования. При этом используется разрывное поле скоростей перемещений, которое состоит из блока деформаций и жестких блоков. Блоки разделены поверхностями разрыва скоростей перемещений. Деформации происходят в блоке деформаций и на поверхностях разрыва скоростей. Так как прессование приводит к возникновению микроповреждений, то произведена оценка повреждаемости материала заготовки. При этом использованы критерии кинетики разрушения: энергетическое и деформационное уравнения. Повреждаемость материала зависит от скорости и степени деформирования или только от степени деформирования. Для ряда материалов снижение скорости способствует уменьшению повреждаемости и, следовательно, возможности увеличения степени формоизменения исходной заготовки. Приведены соотношения для расчета жесткости схемы напряжений, от которой так же зависит повреждаемость. Произведены расчеты давления и повреждаемости материала при прессовании заготовок из титанового и высокопрочного алюминиевого сплавов. Показано, что при малых скоростях операции на соответствующем гидропрессовом оборудовании давление прессования значительно уменьшается. Повреждаемость алюминиевого сплава также уменьшается, а для титанового зависит только от степени формоизменения.

Ключевые слова: вязкопластичность, кинематика, поле скоростей, мощность, давление, повреждаемость материала

Для цитирования: Чудин В.Н., Пасынков А.А. Изотермическое прессование в конической матрице релаксирующего материала // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 9–13 doi: 10.30987/2223-4608-2024-9-13

Isothermal extrusion in a cone-type matrix of a relaxing material

Vladimir N. Chudin¹, D. Eng.
Andrey A. Pasyunkov², Ph.D. Eng.
^{1,2} Tula State University, Tula, Russia
^{1,2} mpf-tula@rambler.ru

Abstract. The relations for calculating the deformation mode and force conditions of isothermal extrusion of blanks made of high-strength metallic alloys are proposed. Under isothermal deformation, the material is hardened and softened, which is associated with the manifestation of the viscous properties of the material (creep). In this regard, the state of viscoplasticity is taken on. The deformation state is accompanied by stress relaxation, which is greater the lower the speed (longer duration) of the operation. Based on the mechanics of deformation, the dependence of moulding conditions (deformation, force, damage to the work material)

is expressed by analytical relations. The power balance of activity of forces results in a pressure estimation for isothermal exposure. In this case, a discontinuous field of path velocities is used, which consists of a block of deformations and rigid blocks. The blocks are separated by slip surfaces. Deformations occur in the deformation block and on slip surfaces. Since pressing leads to the occurrence of micro-damages, the damage rate of the coating material was estimated. In this case, the criteria of fracture kinetics are used: energy and deformation equations. The damage rate of the material depends on the speed and degree of deformation, or solely on the degree of deformation. For a number of materials, reducing the speed helps to reduce damage and, consequently, the possibility of increasing the degree of shaping of the primary blank. The relations for stiffness analysis of the stress pattern are given, on which the damage also depends. Calculations of the pressure and damage of the material under compaction for blanks made of titanium and high-strength aluminum alloys have been performed. It is shown that at low operation speeds on the appropriate hydraulic forging equipment, the exposure pressure decreases significantly. The aluminum alloy damaging is also reduced, and for titanium it depends only on the degree of forming.

Keywords: viscoplasticity, kinematics, velocity field, power, pressure, material damage rate

For citation: Chudin V.N., Pasyukov A.A. Isothermal extrusion in a cone-type matrix of a relaxing material / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 9–13. doi: 10.30987/2223-4608-2024-9-13

Введение

Процессы изотермического прессования применяют в обработке давлением заготовок из высокопрочных сплавов [1]. Нагрев производят в штампе и поддерживают в процессе формоизменения. При этом деформируемый материал проявляет вязкие свойства. Происходит его упрочнение и разупрочнение в связи с релаксацией напряжений. Релаксация увеличивается при снижении скорости операции, что влияет на силовой и деформационный режимы [2, 3]. Это влияние необходимо учитывать при технологических расчетах. Для ряда процессов изотермической объемной штамповки такие расчеты приведены в работе [4]. Схема прессования приведена на рис. 1, а. Используется верхнеграницный энергетический метод расчета используя кинематику деформирования с

помощью разрывного поля скоростей перемещений [3, 4].

Кинематика, мощность, давление

Установим кинематику деформирования, введя разрывное поле скоростей перемещений (см. рис. 1, а). Поле состоит из блока деформаций «1» и жестких блоков «0», «2». Оснастка обозначена как блок «3». Блоки разделены поверхностями разрыва скоростей с образующими линиями «01» и «12» и ограничены контактной поверхностью трения «13». Длины образующих линий «01», «12» и «13» соответственно:

$$l_{01} = \frac{r_0}{\sin \beta}; l_{12} = \frac{r_1}{\sin \gamma}; l_{13} = l_{\text{тр}} = \frac{r_0 - r_1}{\sin \alpha}, \quad (1)$$

где r_0, r_1 – радиусы исходной и конечной заготовки; α – угол конуса матрицы.

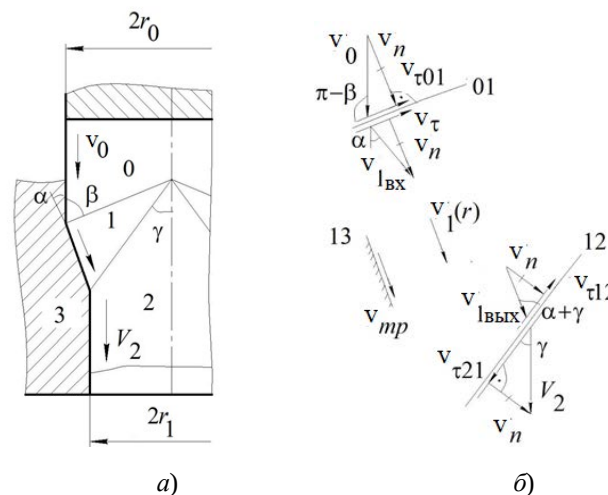


Рис. 1. Схема прессования, поле (а) и план скоростей перемещений (б)

Fig. 1. Extrusion scheme, field (a) and path velocity plan (b)

Углы β, α связаны с выражением:

$$\gamma = \arctg \operatorname{ctg} \frac{1}{r_1} [(r_0 - r_1) \operatorname{ctg} \alpha + r_0 \cdot \operatorname{ctg} \beta].$$

Деформации происходят в блоке «1» и на поверхностях разрыва скоростей. В блоке деформаций скорость перемещения материала заготовки по конусу представим функцией текущего радиуса заготовки на конусе матрицы

$$v_1(r) = v_0[1 - k(r_0 - r)] \sin \beta, \quad (2)$$

$$\text{где } k = \left[1 - \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \frac{\sin \gamma}{\sin \beta \cdot \sin(\alpha + \gamma)} \right] / (r_0 - r_1).$$

Функция (2) соответствует граничным условиям для скорости на входе и выходе из блока деформаций, т. е.:

$$v_1(r) = v_{1\text{вх}} = v_0 \sin \beta, \text{ при } r = r_0;$$

$$v_1(r) = v_{1\text{вых}} = v_0 \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \frac{\sin \gamma}{\sin(\alpha + \gamma)}, \text{ при } r = r_1.$$

Эквивалентные деформацию и ее скорость запишем в виде:

$$\varepsilon_e = \ln \frac{r_0}{r}; \quad \xi_e = \frac{d\varepsilon_e}{dt} = \frac{1}{r} v_1(r). \quad (3)$$

Эквивалентное напряжение здесь с учетом уравнения состояния при вязкопластичности [3, 4] и выражений (3):

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^m \xi_e^n = A \left(\ln \frac{r_0}{r_1} \right)^m \left[\frac{v_1(r)}{r} \right]^n. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволяют представить мощность внутренних сил в данном блоке соотношением:

$$N_1 = \int \sigma_e \xi_e dW_1 = \pi A \frac{r_1(r_0 - r_1) \sin(\alpha + \gamma)}{\sin \alpha \sin \gamma} \left(\ln \frac{r_0}{r_1} \right)^m \int_{r_1}^{r_0} \left[\frac{1}{r} v_1(r) \right]^{1+n} dr. \quad (5)$$

Соотношение (5) интегрируется аналитически при разложении функции скорости в виде [5]:

$$[v_1(r)]^{1+n} = (v_0 \sin \beta)^{1+n} [1 - k(1+n)(r_0 - r)]. \quad (6)$$

Обратимся к поверхностям разрыва скоростей, используя план скоростей (рис. 1, б). На поверхности S_{01} имеем:

$$v_n = v_0 \sin \beta; \quad v_\tau = v_0 [\operatorname{ctg} \beta - \operatorname{ctg}(\alpha + \beta)] \sin \beta, \quad (7)$$

где v_n и v_τ – нормальная и касательная скорости.

Запишем соотношения для эквивалентных деформации, скорости деформации и напряжения, учитывая выражения (7). Таким образом:

$$\varepsilon_e = \frac{v_\tau}{\sqrt{3} v_n}; \quad \xi_e = \frac{1}{t} \varepsilon_e = \frac{v_\tau}{l_{01}} \varepsilon_e = \frac{\varepsilon_e}{r_0} v_\tau \sin \beta; \quad (8)$$

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^{m+n} \left(\frac{v_\tau}{r_0} \sin \beta \right)^n. \quad (9)$$

Мощность на поверхности разрыва скоростей запишем, используя выражения (7) – (9) соотношением:

$$N_{01} = \sigma_e v_\tau S_{01} = \pi A \frac{r_0^{2-n} v_\tau^{1+m+2n}}{(\sqrt{3} v_n)^{m+n}} \left(\frac{1}{\sin \beta} \right)^{1-n}. \quad (10)$$

Соответствующие выражения для поверхности S_{12} запишем аналогичным образом, т. е.:

$$v_n = v_0 \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 \sin \gamma; \quad v_\tau = v_0 \left(\frac{r_0}{r_1} \right)^2 [\operatorname{ctg} \gamma + \operatorname{ctg}(\alpha + \gamma)] \sin \lambda; \quad (11)$$

$$\varepsilon_e = \frac{v_\tau}{\sqrt{3} v_n}; \quad \xi_e = \frac{1}{l_{12}} \varepsilon_e = \frac{\varepsilon_e}{r_1} v_\tau \sin \gamma; \quad (12)$$

$$\sigma_e = A \varepsilon_e^{m+n} \left(\frac{v_\tau}{r_1} \sin \gamma \right)^n. \quad (13)$$

Мощность на этой поверхности при учете выражений (11) – (13) имеет вид:

$$N_{12} = \sigma_e v_\tau S_{12} = \pi A \frac{r_1^{2-n} v_\tau^{1+m+2n}}{(\sqrt{3} v_n)^{m+n}} \left(\frac{1}{\sin \gamma} \right)^{1-n}. \quad (14)$$

Учтем трение заготовки на конической контактной поверхности матрицы. Выражение для расчета мощности представим как

$$N_{mp} = \pi \mu q (r_0 + r_1) \int_{r_1}^{r_0} v_r(r) dr, \quad (15)$$

где q – внешнее давление; μ – коэффициент трения.
Используя выражения (5), (10), (14), (15) получим соотношение для давления прессования в виде:

$$q \leq \frac{N_1 + N_{01} + N_{12}}{\pi \left[r_0^2 v_0 - \mu(r_0 + r_1) \int_{r_1}^{r_0} v_r(r) dr \right]}. \quad (16)$$

Здесь $0 \leq \omega \leq 1$ – повреждаемости материала; $A_{пр}$ – предельная удельная работа при разрушении.

По деформационному уравнению:

$$\omega = \frac{1}{\varepsilon_{e пр}} \ln \frac{r_0}{r_1}, \quad (18)$$

где $\varepsilon_{e пр}$ – предельная эквивалентная работа.

Соотношение (17) применимо для материалов, повреждаемость которых зависит от скорости прессования. Если такой зависимости нет, то используется соотношение (18).

Предельные константы $A_{пр}$, $\varepsilon_{e пр}$ зависят от жесткости системы напряжений [2, 6], которые определяются как σ_0/σ_e , где $\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_r + \sigma_\phi + \sigma_z)$; $\sigma_r, \sigma_\phi, \sigma_z$ – компоненты напряжений по осям координат; σ_e – эквивалентное напряжение (4). Считаем, что $\sigma_z = -q$.

При осевой симметрии из условия текучести [3], следует, что

В соответствии с экстремальной верхнеграничной теоремой пластичности [3] соотношение (16) необходимо минимизировать, используя приведенную выше связь углов α, β, γ поля скоростей, т. е. $\partial q/\partial \beta = 0$.

Повреждаемость материала

Воспользуемся уравнениями кинетики повреждаемости [6, 7]. В блоке деформаций по энергетическому уравнению получим:

$$\omega = \frac{1}{A_{пр}} \int \sigma_e \xi_e \frac{dr}{v_1} = \frac{A}{A_{пр}} \left(\ln \frac{r_0}{r_1} \right)^m \int_{r_1}^{r_0} \left(\frac{1}{r} \right)^{1+n} [v_1(r)]^n dr. \quad (17)$$

$$\sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e - q.$$

Так как при полной пластичности принимается $\sigma_r = \sigma_\phi$, то

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_e} = \frac{4}{3\sqrt{3}} - \frac{|q|}{\sigma_e}. \quad (19)$$

При известной жесткости (19) предельные константы определяются по выражениям [2]:

$$A_{пр} = c_1 \exp \left(A_1 \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \right); \varepsilon_{e пр} = c_2 \exp \left(A_2 \frac{\sigma_0}{\sigma_e} \right), \quad (20)$$

где A_1, A_2, c_1, c_2 – эмпирические коэффициенты.

Расчетные результаты

Расчеты выполнены для прессования заготовок из сплавов титана и алюминия. Константы этих сплавов приведены в табл. 1.

1. Константы сплавов титана и алюминия

1. Constants of titanium and aluminum alloys

Сплав	$T, ^\circ\text{C}$	$A, \frac{H \cdot c^n}{M^2}$	m	n	$A_{пр}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{e пр}$
BT6C	930	70	0,03	0,05	-	1,2
Алгб6	450	60	0,10	0,03	$5 \cdot 10^2$	-

Приняты размеры: $r = 25$ мм; $r_1 = 18$ мм; $\alpha = 30^\circ$; $\beta = 70^\circ$; $\gamma = 42^\circ$. Коэффициент трения $\mu = 0,1$.

Установлено, что в процессе прессования наряду с упрочнением материала заготовки происходит разупрочнение, т. е. релаксация напряжений во времени. Давление прессования зависит, следовательно, от скорости операции.

При снижении скорости в пределах $5 \cdot 10^2 \geq v_0 \geq 10$ мм/мин давление изменилось соответственно для сплава

BT6C $33 \geq q \geq 25$ МПа и для сплава Алгб6 $43 \geq q \geq 33$ МПа, также зависит от скорости прессования. В пределах данной скорости она уменьшилась и составила $0,27 \geq \omega \geq 0,2$. Повреждаемость сплава BT6C от скорости не зависит и при заданной степени прессования составляет $\omega = 0,27$. Таким образом повреждаемость алюминиевого сплава незначительна по сравнению со сплавом титана. При других температурных условиях

повреждаемость титановых сплавов может зависеть от скорости формоизменения [2].

Расчетные данные соответствуют экспериментально-технологическим и использованы в производстве [2, 4].

Выводы

1. Изотермическое прессование на гидропрессовом оборудовании производится в условиях вязкопластического деформирования. Деформационное упрочнение материала заготовки сопровождается релаксацией напряжений во времени.

2. Величина давления зависит от длительности операции и уменьшается при малых скоростях формоизменения.

3. Повреждаемость материала заготовки может зависеть от скорости или только от степени деформирования. На величину повреждаемости влияет так же жесткость схемы напряжений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка** и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка / под ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
2. **Изотермическое** формоизменение анизотропных материалов / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин и др. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.
3. **Теория** обработки металлов давлением / под ред. Голенкова В.А., Яковлева С.П. и др. М. Машиностроение. 2009. 442 с.
4. **Чудин В.Н., Пасынков А.А.** Нестационарные процессы изотермической штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2018. №6. С. 23–28.
5. **Двайт Г.Б.** Таблицы интегралов. М.: Наука. 1973. 228 с.
6. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением М.: Металлургия, 1986. 688 с.
7. **Гун Г.Я.** Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия. 1980. 456 с.
8. **Нуждин Г.А., Галкин Ю.С., Хрычев И.С.** Оценка характера течения металла при выдавливании с

подталкиванием // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 9. С. 631–634.

9 **Черняев А.В., Усенко Н.А., Коротков В.А., Платонов В.И.** Определение влияния скорости деформации на сопротивление деформированию при статическом растяжении с повышенной температурой // Цветные металлы. 2019. № 5. С. 60–66.

10. **Пасынков А.А., Ларин С.Н., Исаева А.Н.** Теоретическое обоснование схемы обратного изотермического выдавливания трубной заготовки с активным трением и вытяжкой ее краевой части // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. № 10. С. 462–465.

REFERENCES

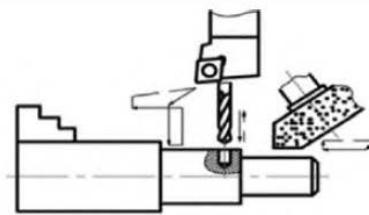
1. Forging and stamping: Handbook: in 4 volumes, vol. 2. Hot volume stamping / edited by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 720 p.
2. Isothermal shaping of anisotropic materials / S.S. Yakovlev, S.P. Yakovlev, V.N. Chudin et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 412 p.
3. Theory of metal forming by pressure / ed. Golenkova V.A., Yakovleva S.P. et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 442 p.
4. Chudin V.N., Pasynkov A.A. Nonstationary processes of isothermal stamping// Forging and stamping production. Pressure metal treatment. 2018, no.6, pp. 23–28.
5. Dwight G.B. Tables of integrals. Moscow: Nauka. 1973, 228 p.
6. Kolmogorov V.L. Mechanics of pressure metal treatment. Moscow: Metallurgia, 1986, 688 p.
7. Gong G.Ya. Theoretical foundations of pressure metal treatment. Moscow: Metallurgia, 1980, 456 p.
8. Nuzhdin G.A., Galkin Yu.S., Hrichev I.S. Assessment of the nature of metal flow under extrusion with squirting // News of TulSU. Technical sciences. 2023, issue 9, pp. 631–634.
9. Chernyaev A.V., Usenko N.A., Korotkov V.A., Platonov V.I. Understanding how deformation rate influences the resistance to deformation under static tension at high temperature // Non-ferrous metals, 2019, no. 5, pp. 60–66.
10. Pasynkov A.A., Larin S.N., Isaeva A.N. Theoretical substantiation of reverse isothermal extrusion scheme of pipe billet with active friction and drawing of its edge part // Blanking productions in mechanical engineering, 2020, no. 10, pp. 462–465.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.02.2024; одобрена после рецензирования 06.03.2024; принята к публикации 11.03.2024.

The article was submitted 26.02.2024; approved after reviewing 06.03.2024; assepted for publication 11.03.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №5 (155). С.14-24.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №5 (155). P.14-24.

Научная статья

УДК 621.941.01

doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

Влияние износа инструмента в процессе физического моделирования шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес на параметр шероховатости

Андрей Андреевич Маликов¹, д.т.н.

Андрей Викторович Сидоркин², к.т.н.

Валерий Дмитриевич Артамонов³, д.т.н.

Юрий Вячеславович Ковалев⁴, аспирант

^{1, 2, 3, 4} Тульский государственный университет, Тула, Россия

¹ tppizi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6757-5584>

² alan-a@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ v.d.art@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

⁴ y@vkvov.me, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрены основные вопросы, связанные с результатами проведенного экспериментального исследования, направленного на моделирование комбинированного (режущо-деформирующего) чистового процесса зубообработки – шевингования – прикатывания цилиндрических зубчатых колес, в процессе точения специальным комбинированным режущо-деформирующим инструментом – резцом цилиндрической заготовки, разделенной на равные рабочие участки. Благодаря оригинальной методике исследования, в ходе моделируемого процесса, за один установ компактной цилиндрической заготовки, на токарном станке с ЧПУ имитируется зубообработка достаточно крупной партии цилиндрических колес-представителей, обладающих среднестатистическими параметрами, из нескольких тысяч штук. Проведен анализ результатов эксперимента, позволяющего, в лабораторных условиях, получить сведения о ходе зубообработки большой партии зубчатых колес. Определен параметр шероховатости обработки участков заготовки, выявлены границы наступления технологического износа инструмента по данному параметру. Выявленная картина износа инструмента представляется, при этом следующей: превалирующий износ инструмента происходит по задней поверхности ввиду его конструктивной особенности – нулевого заднего угла, усугубляющийся технологической особенностью процесса (шевингования – прикатывания), при которой задняя поверхность участвует в поверхностном пластическом деформировании, сминая слой металла при воздействии существенной нормальной силы, и как следствие, возникающей силы трения между его задней поверхностью и поверхностью обрабатываемой заготовки. Износ инструмента по передней поверхности, сопровождаемый затуплением его режущей кромки дополнительно ухудшает условия протекания процесса резания (при съеме малых припусков порядка 0,02 мм), и увеличивая долю поверхностной пластической деформации (в процессе шевингования – прикатывания). Это, в итоге, повышает долю материала обрабатываемой заготовки, удаляемую не резанием, а поверхностным пластическим деформированием, тем самым еще сильнее усугубляя износ инструмента по задней поверхности.

Ключевые слова: шевингование – прикатывание, шероховатость, износ, цилиндрические зубчатые колеса, процесс, моделирование, эксперимент, инструмент

Для цитирования: Маликов А.А., Сидоркин А.В., Артамонов В.Д., Ковалев Ю.В. Влияние износа инструмента в процессе физического моделирования шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес на параметр шероховатости // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 14–24. doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

Tool degradation effect on roughness factor in the process of physical modeling of cylindrical gear shaving and rolling

Andrey A. Malikov¹, D. Eng.

Andrey V. Sidorkin², Ph.D. Eng.

Valery D. Artamonov³, D. Eng.

Yuri V. Kovalev⁴, PG student

^{1, 2, 3, 4} Tula State University, Tula, Russia

¹ tppizi@yandex.ru

² alan-a@mail.ru

³ v.d.art@mail.ru

⁴ y@vkov.me

Abstract. The main issues related to the results of an experimental study aimed at modeling of the combined (cutting-deforming) finishing process of a gear processing, i.e. cylindrical gear shaving and rolling, under turning with a special combined cutting-deforming tool, which is a single-tip tool of a cylindrical work, divided into equal working areas. Due to the proprietary exploratory procedure used for prototype process, in one operation of a compact cylindrical work, a gear processing of a sufficiently large batch of horizontal wheels-representatives with average parameters, consisting of several thousand pieces, is simulated on a CNC lathe. The analysis of the results of the experiment was treated, allowing us to obtain information about gear processing of a large batch of gears in laboratory conditions. The roughness parameter of the work on workpiece areas is determined, the boundaries of tool degradation for this parameter are revealed. The revealed pattern of tool degradation appears to be the following: the prevailing wear of the tool occurs along the back surface due to its design feature, i.e. zero angle of its back, aggravated by the technological characteristics of the process (shaving - rolling), in which the back is involved in the surface plastic deformation, in particular, crushing a metal layer under the influence of a significant normal load. This results in frictional load taking place between its back surface and the surface of the processed workpiece. Tool degradation along the front surface, accompanied by its tool cutter blunting of its cutting edge, contributes to further deterioration of cutting process conditions (when stock removal of about 0.02 mm), and at the same time increases the proportion of surface plastic deformation (when shaving-rolling). This, as a result, increases the workpiece material share, which should be removed not by cutting, but by surface plastic deformation, thereby further redoubling a wear bit in its back surface.

Keywords: shaving – rolling, roughness, degradation (wear), cylindrical gears, process, modeling, experiment, tool

For citation: Malikov A.A., Sidorkin A.V., Artamonov V.D., Kovalev Yu.V. Tool degradation effect on roughness factor in the process of physical modeling of cylindrical gear shaving and rolling / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 14–24. doi: 10.30987/2223-4608-2024-14-24

Введение

В Тульском государственном университете на протяжении последних десятилетий серьезное внимание уделяется аспектам построения высокопроизводительных ресурсосберегающих процессов комбинированной (режуще-деформирующей) чистовой зубообработки цилиндрических зубчатых колес (ЦЗК). В многочисленных исследованиях профессоров Валикова Е.Н., Ямникова А.С., Борискина О.И. и их учеников, представленных в работах [1 – 6], отмечается высокая эффективность процесса шевингования-прикатывания для чистовой стадии зубообработки при обеспечении стабильно высоких точностных и качественных параметров венцов, обрабатываемых ЦЗК.

Для реализации рассматриваемого процесса, в условиях производства с большим объемом выпуска, требуется применение специальных инструментов – шеверов-прикатников,

конструкции которых рассчитываются и проектируется индивидуально для каждого зубчатого колеса [3, 5, 7]. Шевера-прикатники ввиду сложной конфигурации режущих элементов и достаточно больших массогабаритных параметров (габаритный диаметр d_a до 250 мм, масса m до 3 кг), как правило, изготавливаются из быстрорежущей стали, в частности, марки Р6М5 ГОСТ 19265-73. Поскольку шевер-прикатник является дорогостоящим и сложным в изготовлении инструментом, то, очевидно, что аспектам его проектирования, изготовления и эксплуатации должно быть уделено серьезное внимание. В частности, одной из важнейших технико-экономических характеристик, определяющих эффективность использования такого инструмента при производстве ЦЗК является ресурс его работы.

Одним из важнейших показателей, определяющих величину допустимого технологического износа инструмента, после которого требуется его замена, является шероховатость

поверхностей деталей, подвергающихся обработке. Для боковых (эвольвентных) поверхностей зубьев ЦЗК, этот показатель, усредненно, находится в пределах $Ra = 1,6 \text{ мкм}$ [8 – 10].

Проведение комплексного экспериментального исследования, направленного на углубленное изучение рассматриваемого вопроса подразумевает обработку большого объема ЦЗК с использованием специализированного технологического оборудования, что в условиях современных реалий, является весьма затруднительным. Поэтому, коллективом ученых кафедры «Технология машиностроения» ТулГУ была предложена концепция физического моделирования процесса шевингования-прикатывания ЦЗК по аналогии с процессом точения [11] и разработана методика проектирования и изготовления специального режуще-деформирующего инструмента [12], позволяющие, с высокой степенью точности, изучить ход протекания процесса комбинированной чистой зубообработки и механизм износа зубьев инструмента, задействованного в нем.

Основные принципы построения и особенности реализации экспериментального исследования

Процесс моделирования осуществляется в лабораторных условиях кафедры «Технология машиностроения» ТулГУ. Экспериментальные исследования выполняются на базе токарного станка с ЧПУ TOP TURN CNC-S16C (рис. 1 и рис. 2), обладающего высокой точностью, достаточной жесткостью и необходимым набором технологических возможностей.

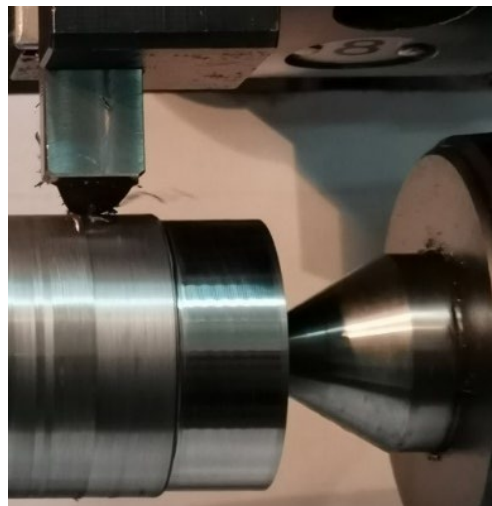


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки на базе токарного станка с ЧПУ TOP TURN CNC-S16C

Fig. 1. General view of the experimental installation based on a CNC lathe TOP TURN CNC-S16C



a)



b)

Рис. 2. Фотография зоны обработки заготовки на токарном станке с ЧПУ TOP TURN CNC-S16C:
a – общий вид; б – крупным планом

Fig. 2. Photo of the workpiece processing area on a CNC lathe TOP TURN CNC-S16C:
a – general view; b – detail shot

В ходе эксперимента комбинированной (режуще-деформирующей) обработке подвергается цилиндрическая заготовка, выполняемая из стали 20Х ГОСТ 4543-2016. Заготовка имеет диаметр $D_{\text{заг}} = 40 \text{ мм}$ и длину $L_{\text{заг}} = 390 \text{ мм}$, что обеспечивает соотношение $L_{\text{заг}} / D_{\text{заг}} < 10$. Такое соотношение, при установке заготовки в трехкулачковом самоцентрирующем патроне с поджимом задним вращающимся центром позволяет добиться высокой точности и качества обработки при достаточной жесткости элементов технологической системы.

Если рассмотреть цилиндрическое зубчатое колесо-представитель, имеющий среднестатистические параметры: $m = 2 \text{ мм}$; $z_1 = 20$; $x = 0$, то работа специального режуще-деформирующего инструмента на одном

рабочем участке заготовки будет эквивалентна обработке $n_{\text{ЦЗК р.у.}} \approx 108$ колес, а совокупное число эквивалентных обработанных ЦЗК для всей заготовки – $n_{\text{ЦЗК заг.}} \approx 3240$ [13].

Конструкция заготовки [13] показана на эскизе, представленном на рис. 3. Заготовка

имеет в своем составе тридцать рабочих участков I...XXX, длиной по 5 мм каждый. Участки разделены канавками, шириной $b_k = 5$ мм, предназначенными для выхода специального режуще-деформирующего инструмента.

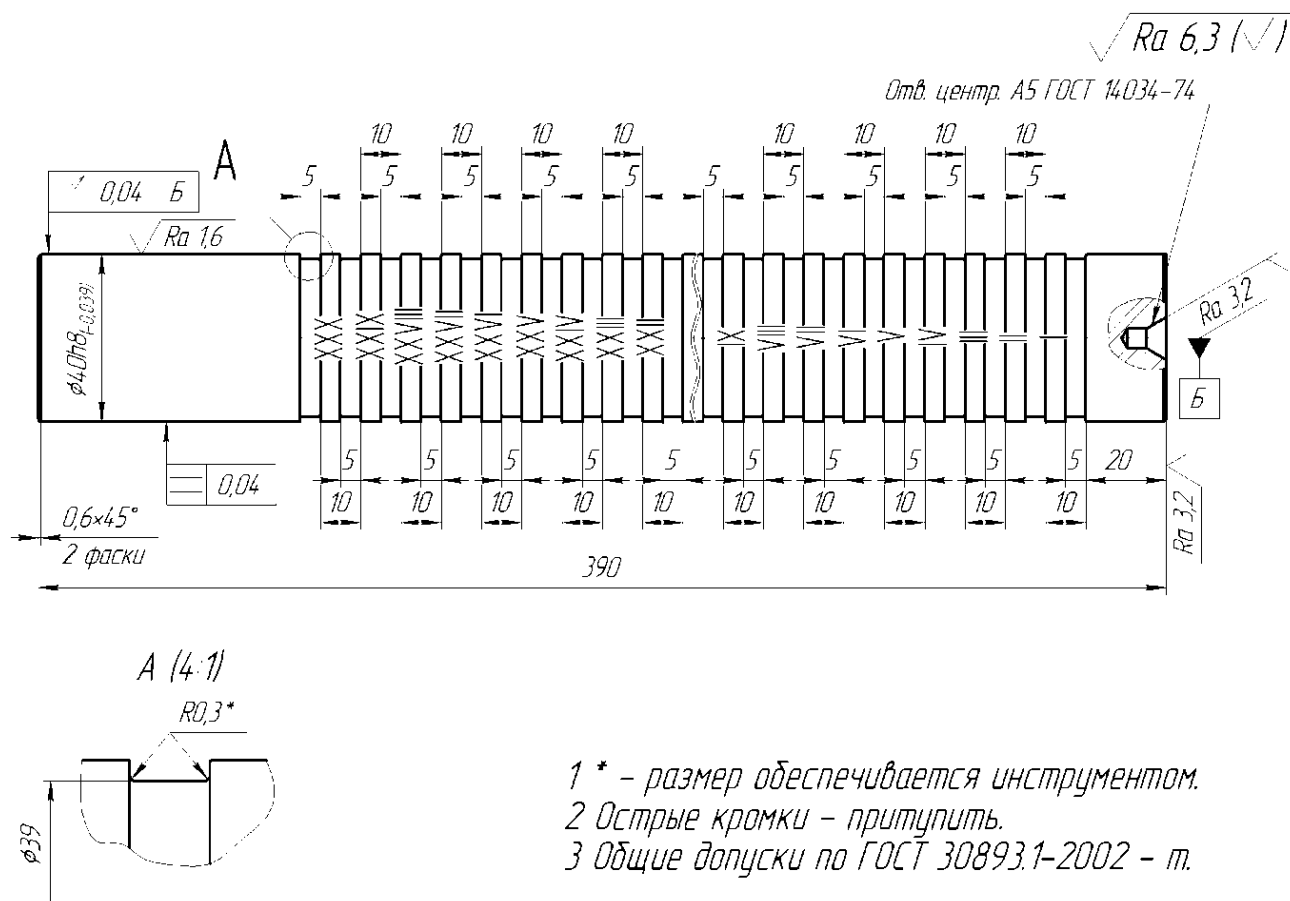


Рис. 3. Конструкция экспериментальной заготовки

Fig. 3. Experimental workpiece design

Основной задачей исследования является выявление динамики изменения показателя шероховатости обрабатываемых поверхностей цилиндрической заготовки в процессе моделирования шевингования-прикатывания ЦЗК и стабильность поддержания рассматриваемого показателя (в заданных пределах) в процессе размерного износа инструмента. Для этого использовалась заготовка, все тридцать участков которой были обработаны, после ее установки на станок с ЧПУ, токарным резцом, имеющим небольшой период наработки (прошедшим стадию приработки). После чего, не

снямая заготовки со станка, ее характерные участки были промерены портативным профилометром Hommel-Etamic W5 (основные характеристики которого приведены на интернет-сайте [14]). Шероховатость обработанных поверхностей (после точения) колебалась в пределах $Ra = 1,48 \dots 1,67$ мкм. Промеры производились после остывания заготовки до температуры 25 ± 5 °С и удаления с нее остатков смазочно-охлаждающей жидкости СОЖ.

После чего производилась последовательная обработка всех тридцати участков заготовки на одном наласточном размере

(по оси X). Обработка осуществлялась специальным резцом [12], установленным в блоке резцедержателя (рис. 4).

По завершении обработки производилось построение профилограмм и измерение параметра шероховатости обработанных участков заготовки профилометром Mitutoyo Surftest SJ-301 (основные характеристики которого приведены на интернет-сайте [15]).

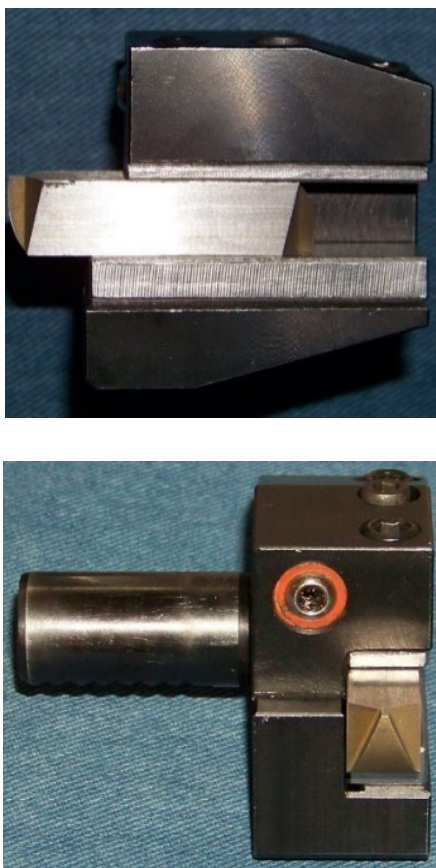


Рис. 4. Фотография инструмента, установленного в резцедержателе

Fig. 4. Photo of the tool installed in the tool holder

Как ранее отмечалось в работе [16], лимитирующим фактором, определяющим эффективность протекания процесса чистовой зубообработки ЦЗК шевингованием – прикатыванием, в условиях производства с большим объемом выпуска, является износ зубьев инструмента – шевера-прикатника по задним поверхностям. Для обеспечения нормальных условий работы инструмента и протекания процесса в целом, весьма важным

становится определение критерия и количественного показателя (в конечном счете, числа обработанных ЦЗК) предельно допустимого износа, при достижении критического значения которого, дальнейшая работа инструмента должна быть прекращена. Однако, критерий затупления не является здесь определяющим. Это объясняется тем, что время работы инструмента до достижения общепринятого (для классического металлорежущего инструмента) критерия оптимального износа не позволяет, в рассматриваемом нами случае, успешно осуществлять его эксплуатацию, т. к. главенствующим здесь становится критерий технологического износа.

Под технологическим условием понимать такой износ, при котором работа инструмента прекращается по технологическим ограничениям: достижении предельного допустимого показателя шероховатости обработанной поверхности, неудовлетворяющего установленным техническим требованиям, вследствие износа инструмента.

Упрощенно процесс экспериментального исследования физического моделирования шевингования – прикатывания ЦЗК заключается в обработке тридцати участков цилиндрической заготовки последовательным многопроходным точением и прикатыванием. Заготовка вращается с частотой 120 об/мин, что соответствует скорости резания 15 м/мин. Подача на оборот заготовки – 0,194 мм/об. Припуск, удаляемый на каждом рабочем ходу – 0,02 мм. После удаления припуска резанем, осуществляемого на прямом вращении заготовки, производится реверсирование ее вращения и удаления аналогичного слоя за счет поверхностного пластического деформирования – прикатывания. Режимы обработки, при этом, остаются те же, что и при резании. Обработка осуществляется за три рабочих цикла (прямое вращение – реверсирование) с периодической радиальной подачей и два цикла выхаживания без подачи. В качестве СОЖ, согласно рекомендациям, изложенным в [17], использовалось индустриальное масло

И-20А. В результате обработки удался припуск порядка 0,12 мм на сторону. Время, затрачиваемое на один, рабочий ход – 12,89 с. Машинное время для обработки одного участка заготовки – 2,11 мин.

Анализ количественных показателей экспериментального исследования

Результаты измерений усредненных значений параметра шероховатости (по участкам), полученных в ходе моделирования процесса шевингования – прикатывания ЦЗК приведены в табл. 1.

1. Шероховатость участков заготовки

1. Roughness of the workpiece areas

№ участка	Ra, мкм	№ участка	Ra, мкм	№ участка	Ra, мкм
1	1,28	11	1,37	21	1,94
2	1,24	12	1,47	22	1,92
3	1,28	13	1,44	23	1,97
4	1,13	14	1,49	24	2,15
5	1,15	15	1,53	25	2,47
6	1,24	16	1,51	26	2,49
7	1,21	17	1,56	27	2,73
8	1,36	18	1,64	28	2,79
9	1,41	19	1,78	29	3,1
10	1,43	20	1,75	30	3,28

Экспериментальная диаграмма, характеризующая динамику изменения параметра шероховатости обработки участков заготовки при моделировании процесса шевингованием – прикатыванием представлена на рис. 5.



Рис. 5. График зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra от количества обработанных участков заготовки N

Fig. 5. Graph of the dependence of the roughness of the treated surface Ra on the number of treated areas of the workpiece N

Аппроксимируя, представленную на рис. 5 эмпирическую кривую полиномиальной функцией второй степени можно получить уравнение зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra , мкм, в процессе технологического износа инструмента, от количества обработанных им участков заготовки N :

$$Ra = 3,4 \cdot 10^{-3} N^2 - 4,34 \cdot 10^{-2} N + 1,3718.$$

И, как следствие, количества деталей-представителей n :

$$Ra = 3 \cdot 10^{-7} n^2 - 4 \cdot 10^{-4} n + 1,3718.$$

При этом коэффициент достоверности аппроксимации R^2 , проводимой по методу наименьших квадратов, для обоих уравнений, описывающих аппроксимирующие кривые, будет равен 0,974, что является очень хорошим показателем. Таким образом, представленные уравнения, с достаточной степенью точности, отражают динамику влияния характера протекания процесса

износа инструмента, работающего в сложном (режущо-деформирующем режиме) на параметр шероховатости обработанной поверхности Ra .

Аппроксимируя, представленную на рис. 5 эмпирическую кривую полиномиальной функцией второй степени можно получить уравнение зависимости шероховатости обработанной поверхности Ra , мкм, в процессе технологического износа инструмента, от количества обработанных им участков заготовки N :

$$Ra = 3,4 \cdot 10^{-3} N^2 - 4,34 \cdot 10^{-2} N + 1,3718.$$

И, как следствие, количества деталей-представителей n :

$$Ra = 3 \cdot 10^{-7} n^2 - 4 \cdot 10^{-4} n + 1,3718.$$

При этом коэффициент достоверности аппроксимации R^2 , проводимой по методу наименьших квадратов, для обоих уравнений, описывающих аппроксимирующие кривые, будет равен 0,974, что является очень хорошим показателем.

Таким образом, представленные уравнения, с достаточной степенью точности, отражают динамику влияния характера протекания процесса износа инструмента, работающего в сложном (режущо-деформирующем режиме) на параметр шероховатости обработанной поверхности Ra .

Профилограммы наиболее показательных участков, характеризующих исследуемый (моделируемый) процесс представлены на рис. 6. Таким образом, представленные уравнения, с достаточной степенью точности, отражают динамику влияния характера протекания процесса износа инструмента, работающего в сложном (режущо-деформирующем режиме) на параметр шероховатости обработанной поверхности Ra .

Таким образом, представленные уравнения, с достаточной степенью точности, отражают динамику влияния характера протекания процесса износа инструмента, работающего в сложном (режущо-деформирующем режиме) на параметр шероховатости обработанной поверхности Ra .

Анализируя (в совокупности), сведения, почерпнутые из рис. 5 и рис. 6 можно прийти к

выводу, что изменение величины параметра шероховатости Ra :

- на участках 1 – 4 – следствие протекания периода приработки инструмента (с начальным затуплением его режущей кромки) при котором параметр шероховатости обрабатываемых поверхностей уменьшается;
- на участках 5 – 8 – следствие стабильного износа инструмента без существенного перераспределения (в рамках комбинированной обработки) процессов резания и поверхностного пластического деформирования в пользу последнего, при этом шероховатость растет незначительно;
- на участках 9 – 14 – следствие стабильного износа инструмента с начинающимся ростом скорости перераспределения (в рамках комбинированной обработки) процессов резания и поверхностного пластического деформирования в пользу последнего (эмпирическая кривая изменения шероховатости имеет пологий участок);
- на участках 15 – 17 – следствие стабильного износа инструмента со стабилизацией процесса перераспределения (в рамках комбинированной обработки) процессов резания и поверхностного пластического деформирования (эмпирическая кривая изменения шероховатости также пологая);
- на участке 18 – параметр шероховатости выходит за предел допустимого значения и процесс технологического износа инструмента можно считать завершенным;
- на участках 19 – 30 – следствие динамичного изменения параметра шероховатости за счет существенного ускорения износа инструмента по задней поверхности и затупления его режущей кромки, проявляющегося в пагубном росте шероховатости обрабатываемых поверхностей, а на конечных участках обрабатываемой заготовки, появлению задиров и выдавливанию (в область межучастковых канавок) крупных заусенцев (рис. 7). Картина износа инструмента, наблюдаемая на последних участках обрабатываемой им заготовки, соответствует периоду повышенного износа, который для классического инструмента (при условии возможности размерной подналадки), со временем, перешел бы в катастрофический.

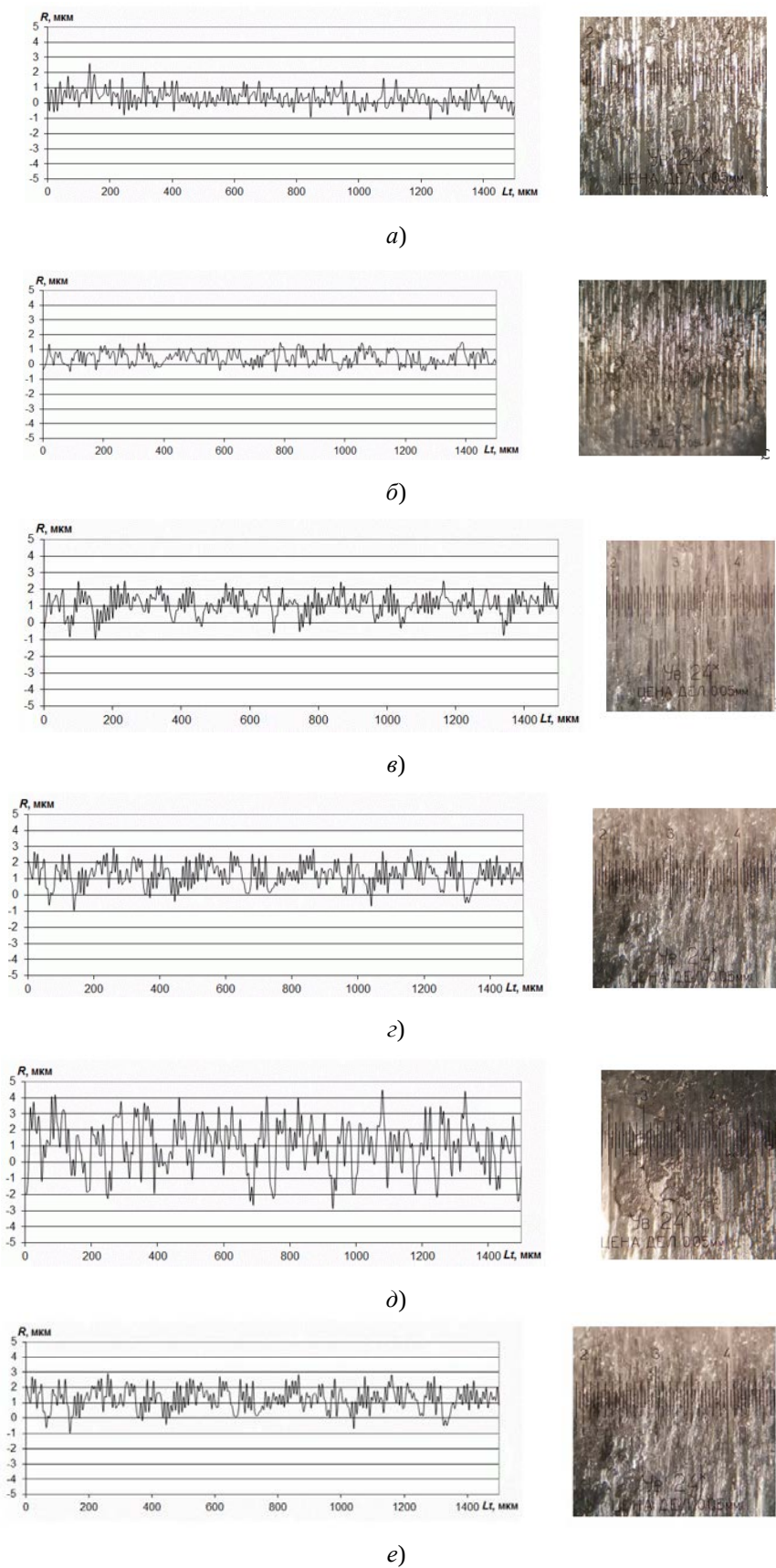
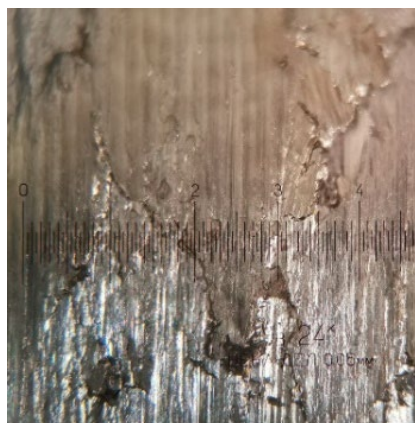


Рис. 6. Профилограммы и увеличенные изображения обработанных поверхностей заготовки:
а – участка № 1; б – участка № 4; в – участка № 9; г – участка № 15; д – участка № 18; е – участка № 30

Fig. 6. Profilograms and enlarged images of the treated surfaces of the workpiece:
а – area № 1; б – area № 4; в – area № 9; д – area № 15; е – area № 18; ф – area № 30



а)

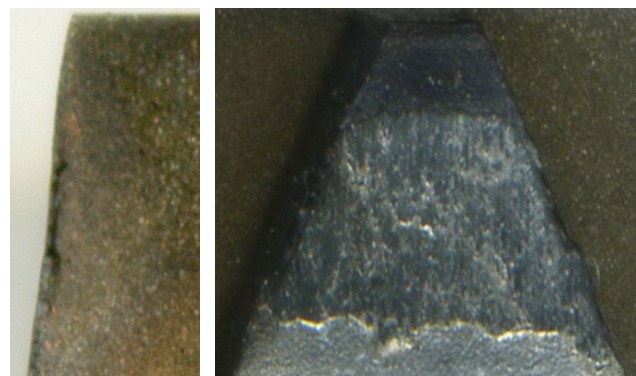


б)

Рис. 7. Увеличенные фотографии задира (а) и выдавленного в заусенец металла (б), полученные при обработке участка № 30

Fig. 7. Macrophotos of the tear (a) and upset metal burr (b) obtained during the processing of area № 30

Увеличенные фотографии левой передней поверхности инструмента и задней (эвольвентной) поверхности инструмента представлены на рис. 8. Фотографии сделаны после обработки инструментом тридцати участков экспериментальной заготовки (эквивалент обработки 3240 колес-представителей шевингованием – прикатыванием). На лунке, образованной износом задней поверхности инструмента, четко просматривается дефектная зона, имеющая существенно большую шероховатость (вплоть до задигов), чем не участвовавшая в работе часть поверхности. Это, в свою очередь, сильно повышает шероховатость обработанных поверхностей.



а)



б)

Рис. 8. Увеличенные фотографии, характеризующие состояние: левой передней поверхности инструмента (а) и задней поверхности (б) по завершении моделирования процесса зубообработки

Fig. 8. Macrophotos characterizing the condition of the left front surface of the tool (a) and the back surface (b) in completion scenario of gear processing modeling

Образованная на передней поверхности инструмента зона затупления режущей кромки, шириной порядка 0,2 мм, приводит к увеличению доли поверхностного пластического деформирования и уменьшению доли резания в процессе шевингования – прикатывания [5].

Основные выводы и результаты

Таким образом, картина износа инструмента представляется следующей. Преобладающий износ инструмента происходит по задней поверхности ввиду его конструктивной особенности – нулевого заднего угла, усугубляющийся технологической особенностью процесса (шевингования – прикатывания), при которой задняя поверхность участвует в поверхностном пластическом деформировании, сминая слой металла при воздействии существенной нормальной силы, и как следствие, возникающей силы трения между его задней поверхностью и поверхностью обрабатываемой заготовки.

Износ инструмента по передней поверхности, сопровождаемый затуплением его режущей кромки дополнительно ухудшает условия протекания процесса резания (при смене малых припусков порядка 0,02 мм), и увеличивая долю поверхностной пластической деформации (в процессе шевингования – прикатывания). Это, в итоге, повышает долю

материала обрабатываемой заготовки, удаляемую не резанием, а поверхностным пластическим деформированием, тем самым еще сильнее усугубляя износ инструмента по задней поверхности.

Основываясь на данных, приведенных в [8 – 10, 17], можно установить, что для боковых (эвольвентных) поверхностей зубьев рассматриваемого колеса-представителя параметр шероховатости Ra не должен превышать 1,6 мкм. Тогда, опираясь на аналогию, в процессе моделирования обработки партии рассматриваемых ЦЗК, величина допустимого технологического износа инструмента будет достигнута при обработке семнадцати участков экспериментальной заготовки. Иными словами, допустимый ресурс работы инструмента по параметру шероховатости составит 1836 колес-представителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Борискин О.И., Валиков Е.Н., Белякова В.А.** Комбинированная обработка зубьев цилиндрических зубчатых колес шевингованием – прикатыванием: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 123 с.
2. **Валиков Е.Н., Белякова В.А.** Режущо-деформирующая чистовая обработка боковых поверхностей зубьев зубчатых колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 216 с.
3. **Валиков Е.Н., Борискин О.И., Белякова В.А.** Расчет шевров-прикатников для чистовой обработки зубьев зубчатых колес: учебн. пособие. Тула: изд-во ТулГУ, 2007. 110 с.
4. **Ямников А.С., Маликов А.А., Валиков Е.Н., Сидоркин А.В.** Ресурсосберегающие технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес // Технология машиностроения. 2008. № 7. С. 7–10.
5. **Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С.** Инновационные технологии обработки зубьев цилиндрических колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 335 с.
6. **Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С.** Резание и пластическое деформирование при шевинговании-прикатывании цилиндрических колес с круговыми зубьями // СТИН. 2012. №11. С. 17–21.
7. **Маликов А.А., Валиков Е.Н., Ямников А.С.** Специфика профилирования режущих кромок шевера-прикатника // Известия ТулГУ. Технические науки. 2008. Вып. 1. С. 152–162.
8. **Дунаев П.Ф., Леликов О.П.** Конструирование узлов и деталей машин – 12-е изд., стер. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 496 с.
9. **Детали машин:** Атлас конструкций: Учеб. пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов. В2-х ч. Ч. 1/ Б.А. Байков, В.И. Богачев, А.В. Буланже и др.; Под общ. ред. Д-ра техн. наук., проф. Д.Н.

Решетова: – 5-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 352 с.

10. **Грязев М.В., Федоров Ю.Н., Артамонов В.Д.** Анализ процессов зубонарезания цилиндрических зубчатых колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 384 с.

11. **Маликов А.А., Сидоркин А.В., Васин С.А., Ковалев Ю.В.** Концептуальные основы физического моделирования процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // СТИН. 2022. № 2. С. 2–7.

12. **Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В.** Особенности проектирования инструмента для физического моделирования процесса шевингования – прикатывания цилиндрических зубчатых колес // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 5. С. 8–14.

13. **Ковалев Ю.В.** Улучшенная конструкция экспериментальной заготовки для моделирования процесса шевингования – прикатывания цилиндрических зубчатых колес // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 5. С. 559 – 562.

14. **Профилометр «Hommel-etamic W5»** [Электронный ресурс] // Технические характеристики прибора URL: https://www.geo-ndt.ru/catalog-25-izmeriteli-sherohovostipofilometripofilemeri/hommel_etamic_w5.htm/ (дата обращения 19.03.2024).

15. **Профилометр «Mitutoyo Surftest SJ-301»** [Электронный ресурс] // Технические характеристики прибора URL: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-561-profilometr-surfest-sj-301-mitutoyo.htm/> (дата обращения 19.03.2024).

16. **Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В., Артамонов В.Д., Маликов Б.А.** Исследование износа инструмента в процессе физического моделирования шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // СТИН. 2023. № 5. С. 26–32.

17. **Овумян Г.Г., Адам Я.И.** Справочник зубореза. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1983. 223 с.

REFERENCES

1. Boriskin O.I., Valikov E.N., Belyakova V.A. Combined processing of teeth of cylindrical gears by shewing - rolling: monograph. Tula: Tula State University Publishing House, 2007. 123 p.
2. Valikov E.N., Belyakova V.A. Cutting-deforming finishing machining of the side surfaces of gear teeth: monograph. Tula: Tula State University Publishing House, 2011. 216 p.
3. Valikov E.N., Boriskin O.I., Belyakova V.A. Calculation of shaver-rollers for finishing of gear teeth: textbook. allowance. Tula: Tula State University Publishing House, 2007. 110 p.
4. Yamnikov A.S., Malikov A.A., Valikov E.N., Sidorkin A.V. Resource-saving technologies for the manufacture of cylindrical gears // Mechanical engineering technology. 2008. No. 7. P. 7–10.
5. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Yamnikov A.S. Innovative technologies for processing the teeth of

cylindrical wheels: monograph. Tula: Tula State University Publishing House, 2011. 335 p.

6. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Yamnikov A.S. Cutting and plastic deformation during shearing and rolling of cylindrical wheels with circular teeth // STIN. 2012. No. 11. pp. 17–21.

7. Malikov A.A., Valikov E.N., Yamnikov A.S. Specifics of profiling the cutting edges of the rolling shaver // News of Tula State University. Technical science. 2008. Vol. 1. pp. 152–162.

8. Dunaev P.F., Lelikov O.P. Design of components and parts of machines - 12th ed., revised. M.: Publishing center «Academy», 2009. 496 p.

9. Machine parts: Atlas of structures: Textbook. a manual for students of mechanical engineering specialties at universities. B2 parts. Part 1/ B.A Baikov, V.I. Bogachev, A.V. Boulanger et al.; Under general ed. Dr. Tech. sc., prof. D.N. Reshetova: – 5th ed. reworked and additional M.: Mechanical Engineering, 1992. 352 p.

10. Gryazev M.V., Fedorov Yu.N., Artamonov V.D. Analysis of gear-cutting processes of cylindrical gears: monograph. Tula: Tula State University Publishing House, 2009. 384 p.

11. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Vasin S.A., Kovalev Yu.V. Conceptual foundations of physical modeling of the process of shaving-rolling cylindrical gears // STIN. 2022. No. 2. P. 2–7.

12. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Kovalev Yu.V. Features of designing a tool for physical modeling of the process of shaving - rolling of cylindrical gears // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. No. 5. pp. 8–14.

13. Kovalev Yu.V. Improved design of an experimental blank for simulating the process of shaving - rolling of cylindrical gears // Izvestia of Tula State University. Technical science. 2023. Issue. 5. pp. 559–562.

14. Profilometer “Hommel-etamic W5” [Electronic resource] // Technical characteristics of the device URL: https://www.geo-ndt.ru/catalog-25-izmeriteli-sherohovato-tosti-profilometri-profilemeri/hommel_etamic_w5.htm/ (date appeal 03/19/2024).

15. Profilometer «Mitutoyo Surftest SJ-301» [Electronic resource] // Technical characteristics of the device URL: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-561-profilometr-surfest-sj-301-mitutoyo.htm/> (access date 03/19/2024).

16. Sidorkin A.V., Kovalev Yu.V., Artamonov V.D., Malikov B.A. Study of tool wear in the process of physical modeling of shaving-rolling of cylindrical gears // STIN. 2023. No. 5. pp. 26–32.

17. Ovumyan G.G., Adam Ya.I. Gear Cutter Handbook. 2nd ed., revised. and additional M.: Mechanical Engineering, 1983. 223 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.03.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 15.03.2024.

The article was submitted 26.03.2024; approved after reviewing 11.03.2024; assepted for publication 15.03.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №5 (155). С. 25-30.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №5 (155). P.25-30.

Научная статья

УДК 621.92

doi: 10.30987/2223-4608-2024-5-25-30

Анализ служебного назначения металлорежущих станков

Борис Мухтарбекович Базров, д.т.н.

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

modul_lab@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8487-8649>

Аннотация. Проведен анализ применения станков в условиях мелкосерийного, серийного и массового производства. Показаны их недостатки: в мелкосерийном производстве – используются широкоуниверсальные обрабатывающие центры, создаваемые в первую очередь под методы обработки, а не под поверхности детали, в итоге создаются станки с избыточными широкими технологическими и техническими возможностями, использования которых на рабочем месте составляет незначительный процент, что снижает эффективность их применения; в серийном производстве – создаваемые специализированные станки охватывают лишь незначительную часть часто встречающихся типовых поверхностей, например, отсутствуют станки под изготовление комплектов баз; в массовом производстве – создаются операционные станки с отсутствием перенастройки, что не позволяет их использовать при внесении изменений в конструкцию изготавливаемой детали. С целью устранения отмеченных недостатков следует создавать специализированные станки под изготовление во всех типах производства модулей поверхностей деталей. В зависимости от типа производства станки должны создаваться под изготовление разных групп видов модулей поверхностей (МП) на станке. В мелкосерийном производстве должны изготавливаться большее число видов МП на одном станке, а при увеличении серийности производства количество видов изготавливаемых МП на одном станке должно уменьшаться. Учитывая высокую повторяемость комплектов баз в изготавливаемых деталях, следует расширить группу специализированных станков за счет создания их под изготовление комплектов баз, разнообразие которых ограничено. Наличие станочного парка под изготовление всех МП позволит внести изменения в методику проектирования технологических процессов. Теперь на технологических операциях должны изготавливаться не отдельные или группы поверхностей, а один или несколько видов МП. Это улучшит качество технологических процессов изготовления деталей за счет сокращения числа операций, т. к. на операциях будут изготавливаться один или несколько МП и снизит трудоемкость их проектирования за счет применения банка данных модулей технологических процессов по изготовлению МП.

Ключевые слова: станок, деталь, поверхность, модуль поверхности, метод обработки, тип производства, технологический процесс, операция, эффективность

Для цитирования: Базров Б.М. Анализ служебного назначения металлорежущих станков // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 25–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-5-25-30

Analysis of metal-cutting machines in-tended service

Boris M. Bazrov, D. Eng.

Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov, Russian Academy of Sciences,

Moscow, Russia

modul_lab@mail.ru

Abstract. The analysis of machining facility used for short-run production, large-scale or mass-production operations has been carried out. Their disadvantages are presented in the work, i.e., in a short-run production, superuniversal machining center units are used, being primarily made for processing techniques, but not for the surface of the part. Such machines, having excessive wide technological and technical capabilities, remain untapped in the workplace, becoming low effective in the application; in mass production, designed process-specialized machines can cover only a small part of the common typical surfaces, that means, there are no machines for making bearing arrangement, in mass production operational machines are designed with no reconfiguration, which makes their application impossible when there is some introduction of changes in the structure of the manufactured part. To eliminate these disadvantages, it is necessary to design specialized machines for manufacturing in all types of production of programme units for parts surfaces. Depending on the type of production, machines should be designed for the manufacture of different groups of surface modules (SM) types. In a short-run production, a large number of types of SM should be manufactured on one machine, and with an increase in the production cycle, the number of SM types manufactured on one machine should

decrease. Taking into account the high frequency of sets of bases in manufactured parts, it is necessary to expand the group of specialized machines through their design for the manufacture of sets of bearing arrangements, where the production of their diversity is limited. The machine tool holding for the manufacture of all SM will allow changes to be made to the designing technological processes technique. So, technological operations should be aimed not at machining individual surfaces or groups of surfaces, but at one or more types of SM. This will improve the quality of manufacturing activity for parts production by reducing the number of operations, since one or more SM will be machined and it will reduce the labor intensity of their engineering process due to the use of a data bank of modules of process industries for the manufacture of SM.

Keywords: machine, part, surface, surface module, tooling method, type of production, manufacturing activity, operation, efficiency

For citation: Bazrov B.M. Analysis of metal-cutting machines intended service / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 25–30. doi: 10.30987/2223-4608-2024-25-30

Любой станок предназначен для изготовления соответствующих видов поверхностей детали. Однако современные металлорежущие станки в условиях мелкосерийного производства создаются под методы изготовления деталей, а получаемые поверхности являются следствием этих методов обработки [1, 2]. Это объясняется тем, что разнообразие видов поверхностей детали и их характеристики практически неограниченны и непредсказуемы.

В результате создаются станки с избыточными технологическими и техническими возможностями, процент использования которых оказывается незначительным, а стоимость станка увеличивается. Этот недостаток наиболее полно проявляется у обрабатывающих центров.

Поэтому, при создании станка в первую очередь должны быть заданы виды поверхностей деталей с их характеристиками, под изготовление которых создается станок. Как известно изготовление деталей на станке обеспечивается законом относительного движения заготовки и инструмента, которые характеризуются совокупностью формообразующих движений из шести возможных: трех поступательных P_x , P_y , P_z ; трех вращательных V_x , V_y , V_z . Например, изготавливаемые поверхности вращения детали на токарно-винторезном станке образуются в результате двух поступательных движений суппорта с инструментом и одного вращательного движения заготовки.

Итак, проектирование станка должно начинаться с определения совокупности формообразующих движений в соответствии с видами поверхностей, под изготовление которых он создается.

Разнообразие видов изготавливаемых поверхностей на станке зависит от уровня серийности производства, в котором должен эксплуатироваться станок. В мелкосерийном

производстве станки создаются широкоуниверсальными, такие как обрабатывающие центры под изготовление широкого разнообразия видов поверхностей деталей.

В среднесерийном производстве, для которого характерно существенное снижение разнообразия конструкций изготавливаемых деталей и высокая их повторяемость привела к созданию специализированных станков, например, таких как резьбообрабатывающие, зубообрабатывающие и др. станки.

Недостатком таких станков является то, что они охватывают лишь незначительную часть видов поверхностей детали. В результате появление деталей содержащие другие виды поверхностей с их высокой повторяемостью приходится изготавливать на универсальных станках, что существенно снижает эффективность их эксплуатации.

В массовом производстве используются операционные станки, предназначенные для изготовления заданной группы поверхностей детали. Их недостатки заключаются в том, что, во-первых, под изготовление конкретной детали приходится изготавливать специальные – операционные станки, а под изготовление новой детали приходится изготавливать другие станки. Во-вторых, в случае внесения даже незначительного изменения в конструкции изготавливаемой детали приходится на некоторых операциях заменять станки на другие. В некоторых случаях при длительном производстве одних и тех же деталей используют станки с отдельными расширенными технологическими и техническими характеристиками. Это объясняется тем, что при внесении изменений в конструкции изготавливаемых деталей не приходится заменять станки на новые.

Надо также отметить, что традиционный парк универсальных станков оказывает негативное влияние на эффективность

разрабатываемых технологических процессов изготовления деталей. Это проявляется в том, что часто группы поверхностей, предназначенных для выполнения соответствующей служебной функции детали, вынуждены изготавливать на разных станках, что приводит к накоплению погрешностей их относительного положения. В результате это вынуждает вводить в ряде случаев дополнительную технологическую операцию для их устранения, что снижает эффективность технологического процесса. Например, комплект баз – торец, отверстие и шпоночный паз вынуждены изготавливать поверхности комплекта баз на разных операциях: отверстие и торец на одной операции, а шпоночный паз на другой операции.

Подводя итог анализа назначения станков можно сделать вывод о том, что с целью устранения отмеченных недостатков необходимо создавать станки не под методы обработки и не под изготовление отдельных видов поверхностей или случайных групп поверхностей деталей, а под изготовление совокупности поверхностей детали, связанных с выполнением соответствующей служебной ее функции. Под последними будем понимать модули поверхностей (МП) детали, где под МП понимается сочетание поверхностей детали, предназначенное для выполнения соответствующей ее служебной функции [3].

Виды МП делятся на три класса: базирующие (МПБ), рабочие (МНР), связующие (МПС) модули поверхности. Как показали исследования [4], число видов МПБ равно 14: Б11, Б12, Б211, Б212, Б221, Б222, Б311, Б312, Б321, Б322, Б41, Б42, Б51, Б52 и по 6 видов МНР: Р111, Р112, Р121, Р122, Р21, Р22 и МПС: С111, С112, С121, С122, С21, С22.

Из изложенного следует, что станки надо создавать под изготовление одного или нескольких видов МП детали, в зависимости от серийности производства.

Анализ традиционных специализированных станков для серийного производства применяемых для изготовления повторяющихся поверхностей детали показывает отсутствие станков для изготовления комплектов баз. В тоже время практически любая деталь содержит как минимум один или несколько комплектов баз. Таким образом, целесообразно создание специализированных станков под

изготовление комплектов баз, номенклатура которых ограничена.

Таким комплектом баз является МПБ. Как отмечалось выше, разнообразие МПБ ограничено 14 вариантами. Отсюда следует, что целесообразно создание станков под изготовление групп МПБ, содержащие в зависимости от серийности производства различное число видов МПБ.

В мелкосерийном производстве должны изготавливаться большее число видов МПБ на одном станке, а при увеличении серийности производства количество видов изготавливаемых МПБ на одном станке должно уменьшаться. Наличие станков под изготовление МПБ позволит повысить эффективность технологических процессов изготовления детали за счет сокращения числа операций, а также снизить трудоемкость их проектирования.

Ограниченное разнообразие видов МПБ позволяет определить гамму станков, с помощью которых могут быть изготовлены все виды МПБ, которые должны найти применения также, как и специализированные станки, например, резьбообрабатывающие и др.

Количество станков в гамме определяется серийностью производства. В мелкосерийном производстве станки должны создаваться под изготовление расширенной группы МПБ, при малом количестве в гамме станков. А по мере увеличения серийности производства растет уровень специализации станков, связанных со снижением разнообразия изготавливаемых видов МПБ, что приводит к увеличению числа станков в гамме.

Точная формулировка служебного назначения станка, в которой указываются какие виды МП с их характеристиками должны изготавливаться на станке, позволит определить необходимый минимум требуемых технологических и технических возможностей станка, что исключит их избыточность, как это имеет место в традиционных универсальных станках.

Рассмотрим возможность применения традиционных станков на технологических операциях по изготовлению МП. В этой связи необходимо определить какие виды МП можно изготавливать на традиционных станках. Методика определения возможностей изготовления видов МП на традиционном станке включает: установление видов поверхностей

детали, которые могут быть изготовлены на станке; установление видов МП, содержащие поверхности, изготавливаемые на станке; установление требуемого расположения МП в рабочем пространстве станка, в котором он может быть изготовлен; установление диапазонов размеров МП, которые могут быть обеспечены; установление достижимой точности изготовления МП на станке.

В качестве примера в табл. 1 приведены станки и указаны, какие виды МП могут быть изготовлены [5 – 7]. Кроме того, следует дополнить в паспортных данных станков информацию об видах МП с их характеристиками (размеры, нормы точности, шероховатость и др.), которые могут быть изготовлены на станках.

1. Модули поверхности, изготавливаемые на металлорежущих станках

1. Surface modules manufactured on metal-cutting machines.

Станки \ МП	Б11	Б12	Б211	Б212	Б221	Б222	Б311	Б312	Б321	Б322	Б41	Б42	Б51
Токарно-винторезный			x	x	x	x	x	x			x	x	
Токарно-карусельный			x	x	x	x	x	x					
Токарный обрабатывающий центр	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Вертикально-сверлильный			x		x		x				x		
Радиально-сверлильный			x		x		x				x		
Горизонтально-фрезерный	x	x							x				x
Вертикально-фрезерный	x	x					x		x				x
Горизонтально-расточной	x	x					x	x	x				
Внутришлифовальный универсальный							x				x		
Круглошлифовальный								x				x	
Плоскошлифовальный с прямоугольным столом и горизонтальным шпинделем		x											
Долбежный	x	x											x
Строгальный	x	x											x
Хонинговальный							x						
Станки \ МП	Б52	Р111	Р112	Р121	Р122	Р21	Р22	С111	С112	С121	С122	С21	С22
Токарно-винторезный	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Токарно-карусельный	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Токарный обрабатывающий центр	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Вертикально-сверлильный		x		x				x		x			
Радиально-сверлильный		x		x				x		x			
Горизонтально-фрезерный	x	x	x			x	x	x	x			x	x
Вертикально-фрезерный	x	x	x	x		x	x	x	x	x		x	x
Горизонтально-расточной		x	x	x	x			x	x	x	x		
Внутришлифовальный универсальный		x		x		x		x		x			
Круглошлифовальный			x		x				x		x		
Плоскошлифовальный с прямоугольным столом и горизонтальным шпинделем	x		x				x		x				x
Долбежный	x	x	x			x	x	x	x			x	x
Строгальный	x	x	x			x	x	x	x			x	x
Хонинговальный				x						x			

Наличие номенклатуры станков под изготовление всех видов МП позволит повысить эффективность как самих технологических процессов изготовления деталей, их качество, так и снизить трудоемкость проектирования. Это потребует внесение изменений в методику

проектирования технологических процессов изготовления деталей.

В качестве исходных данных теперь деталь должна представляться на чертеже не совокупностью отдельных поверхностей, а совокупностью МП и сопровождаться графом МП,

который показывает, как состав видов МП, содержащихся в детали, так и их относительное расположение и базы, как показано на рис. 1. Эта информация позволит снизить

ошибки при выборе технологических баз на этапе проектирования технологического процесса.

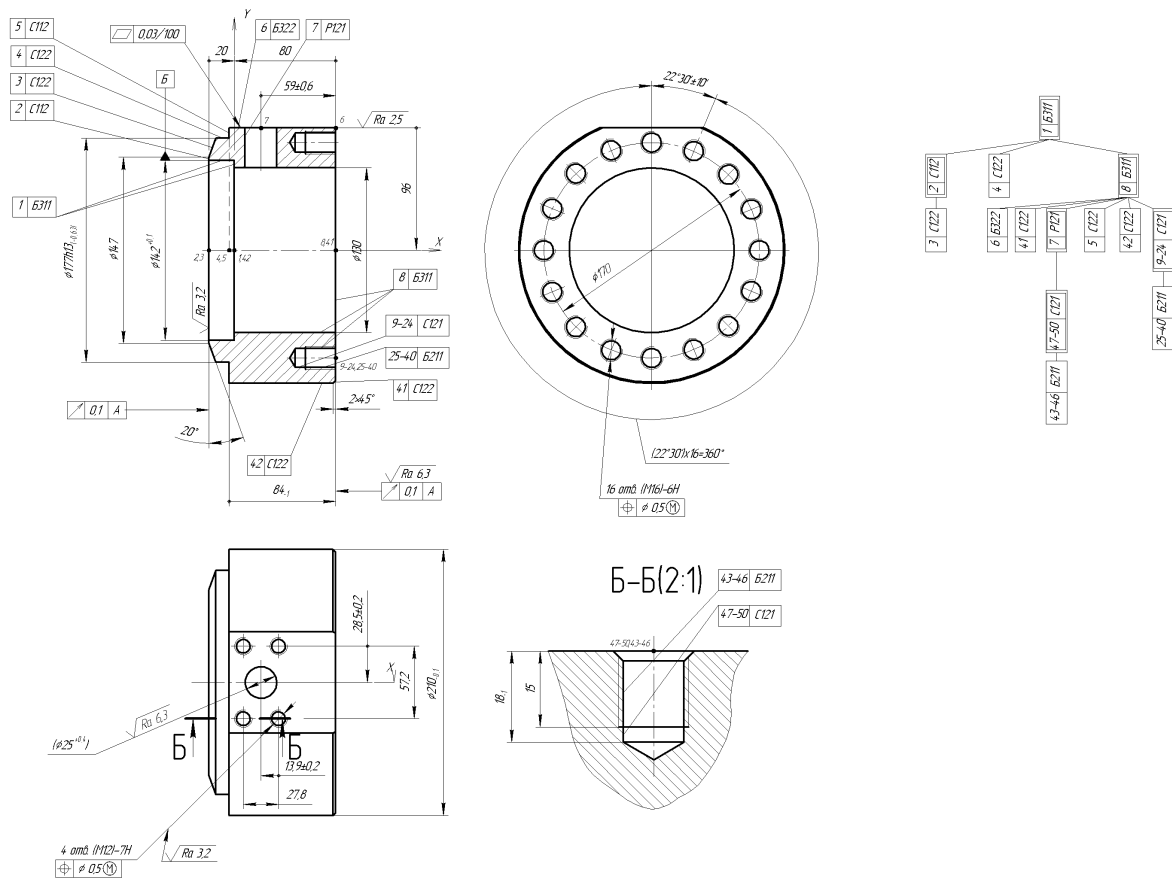


Рис. 1. Чертеж детали в модульном исполнении и граф МП

Fig. 1. Drawing of the part in modular construction and graph SM

Принципиальным отличием технологического процесса по сравнению с традиционным технологическим процессом является то, что маршрутный технологический процесс включает операции, на которых должны изготавливаться один или несколько МП, а технологические операции должны проектироваться методом компоновки из модулей технологических процессов изготовления МП.

Это становится возможным при наличии элементной базы средств технологического обеспечения изготовления МП деталей, отражающих информацию о модулях средств технологического обеспечения МП. В качестве модулей средств технологического обеспечения МП выступают: МТО – модуль; МО – модуль станка; МПр – модуль приспособления;

МИ – модуль инструмента; МКУ – модуль контрольно-измерительного устройства.

Предлагаемая методика проектирования технологических процессов изготовления деталей позволит также снизить влияние на качество технологического процесса квалификации технолога.

Выводы

Традиционные станки имеют существенные недостатки: избыточные технологические и технические возможности станков в мелкосерийном производстве; охват незначительной части изготавливаемых типовых поверхностей детали специализированными станками; отсутствие станков под изготовление комплектов баз; отсутствие у операционных станков возможностей ограниченной перенастройки при

незначительных изменениях в конструкции изготавливаемой детали.

Предлагается создавать станки не под методы обработки или под изготовление типовых отдельных или групп поверхностей, а под изготовление МП.

Ограниченная номенклатура МП позволяет свести к минимуму разнообразие станков.

Наличие станков под изготовление МП деталей позволит повысить эффективность технологических процессов изготовления деталей за счет сокращения числа операций и снизить трудоемкость проектирования процессов.

С целью использования традиционных станков под изготовление МП необходимо провести их идентификацию, показывающую какие МП можно изготовить на станке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Юденков Н.** Тенденции развития мирового станкостроения // Станкоинструмент. 2018. № 1(10). С. 38–52.
2. **Кузнецов А.П.** Направления развития металлорежущих станков: системные принципы Ч. 1 // Станкоинструмент. 2020. № 3 (20). С. 30–41.
3. **Базров Б.М.** Модульная технология // Научные технологии в машиностроении. 2011. № 4. С. 3–10.
4. **Базров Б.М.** Модульный принцип построения станочного оборудования // Вестник машиностроения. 2011. № 11. С. 51–53.
5. **Сахаров А.В.** Определение технологических возможностей станков сверлильно-фрезерно-расточной группы на модульном уровне // Станкоинструмент. 2018. № 4 (13). С. 40–44.

6. **Сахаров А.В., Родионова Н.А.** Определение технологических возможностей токарного обрабатывающего центра // Станкоинструмент. 2019. № 4 (17). С. 36–41.

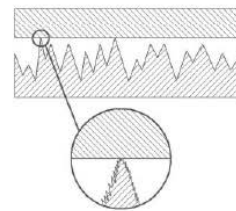
7. **Сахаров А.В.** Определение технологических возможностей вертикального фрезерного обрабатывающего центра // Станкоинструмент. 2020. № 4 (21). С. 48–53.

REFERENCES

1. Yudenkov N. Trends in the global machine tool industry// Stankoinstrument, 2018, no. 1(10), pp. 38–52.
2. Kuznetsov A.P. Directions of development of metal-cutting machines: system principles part 1 // Stankoinstrument, 2020, no. 3 (20), pp. 30–41.
3. Bazrov B.M. Modular technology in mechanical engineering // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2011, no. 4, pp. 3–10.
4. Bazrov B.M. Modular design of machine tools // Vestnik mashinostroeniya, 2011, no. 11, pp. 51–53.
5. Sakharov A.V. Determination of technological capabilities of milling machines' group at modular level // Stankoinstrument, 2018, no. 4 (13), pp. 40–44.
6. Sakharov A.V., Rodionova N.A. Determination of technological possibilities of a turning machining center // Stankoinstrument, 2019, no. 4 (17), pp. 36–41.
7. Sakharov A.V. Determination of technological capabilities of a vertical milling machining center // Stankoinstrument, 2020, no. 4 (21), pp. 48–53.

Статья поступила в редакцию 16.02.2024; одобрена после рецензирования 28.02.2024; принята к публикации 06.03.2024.

The article was submitted 16.02.2024; approved after reviewing 28.02.2024; assepted for publication 06.03.2024.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 31-39.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 31-39.

Научная статья
УДК 621.892.5
doi: 10.30987/2223-4608-2024-31-39

Сравнение трибологических свойств алмазоподобного покрытия в паре со сталью / керамикой при сухом трении и граничной смазке

Илья Александрович Буяновский¹, д.т.н.

Владимир Дмитриевич Самусенко², к.т.н.

Юрий Иванович Щербаков³, научн. сотр.

^{1, 2, 3} Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

¹ buyan37@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-5095>

² samusenkovd@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8093-5372>

³ Shcherbakov_1949@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9786-3491>

Аннотация. Проведённые в последние десятилетия исследования, подтверждённые опытом многолетнего практического использования в узлах трения различных механизмов и машин, применяемых в народном хозяйстве, показали, что эффективным путём обеспечения их долговечности, надёжности и энергосбережения является нанесение алмазоподобных углеродных покрытий на поверхности трения контактирующих деталей этих узлов трения. В настоящее время установлено, что эффективность применения этих покрытий в значительной мере определяется условиями их функционирования и материалами контактирующих деталей. В представленной статье сравниваются по антифрикционным свойствам пары трения, в которых исследуемые стальные образцы с аморфным алмазоподобным углеродным покрытием, нанесённым на сталь через промежуточный слой алумонитрида титана, изнашиваются в условиях сухого трения и граничной смазки. В качестве изнашивающего контртела используются стандартные шарики из стали ШХ-15 и керамики на основе нитрида кремния. Трибологические эксперименты проводятся на известной лабораторной установке КТ-2 с модернизированным узлом трения, позволяющим реализовать контакт изнашивающего шарика с тремя горизонтально расположенными роликами, на цилиндрические поверхности которых нанесено исследуемое покрытие. В статье приведён анализ полученных результатов этих экспериментов. Помимо испытаний алмазоподобного покрытия для сравнения приведены данные по испытаниям образцов без покрытий и с покрытием только слоем алумонитридом титана. Более твердый материал контртела может значительно влиять на трибологические свойства, разрушая покрытия, тем самым сводя положительные эффекты от антифрикционных свойств покрытий, и даже приводить к повышенному износу за счёт образовавшихся абразивных частиц в зоне трения.

Ключевые слова: алмазоподобное покрытие, аморфный углерод, коэффициент трения, износ, керамический изнашивающий образец, полиальфаолеиновое масло, промежуточное покрытие

Благодарности: авторы выражают благодарность профессору Левченко В.А. (Международный объединённый институт перспективных технологий, г. Тайчжоу, Китай) за ценные замечания и интерес к работе.

Для цитирования: Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Щербаков Ю.И. Сравнение трибологических свойств алмазоподобного покрытия в паре со сталью / керамикой при сухом трении и граничной смазке // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 31–39. doi: 10.30987/2223-4608-2024-31-39

Comparison of tribological properties of a DLC jointly with steel / ceramics under dry friction and boundary lubrication

Ilya A. Buyanovsky¹, D. Eng.
Vladimir D. Samusenko², Ph.D. Eng.
Yuri I. Shcherbakov³, RF

^{1, 2, 3} Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

¹ buyan37@mail.ru

² samusenkovd@gmail.com

³ Shcherbakov_1949@mail.ru

Abstract. Studies conducted in the last decade having proven experience of many years of practical use in friction units of various mechanisms and machines used in the national economy, have shown that the effective way to ensure their longevity, reliability and energy conservation is to apply DLC coatings on the friction surfaces of contacting parts in these friction nodes. It has now been established that the effectiveness of the use of these coatings is determined to a large extent by the conditions of their operation and the materials of the contacting parts. In the presented article, friction pairs are compared in terms of anti-friction properties, in which the studied steel samples with an amorphous DLC coating applied to steel through an intermediate layer of titanium aluminide wear out under conditions of dry friction and film lubrication. Standard balls made of bearing chromium alloyed steel and ceramics based on silicon nitride are used as a wearing coupled element. Tribological experiments are carried out on the well-known laboratory installation KT-2 with an upgraded friction unit, which allows for the contact of a wearing ball with three horizontally positioned rollers, on the cylindrical surfaces of which the coating under study is applied. The article provides an analysis of the results of these experiments. In addition to DLC coating tests, data on tests of uncoated and coated samples with only a layer of titanium aluminide are provided for comparison. A harder coupled element material can significantly affect the tribological properties, destroying coatings, thereby reducing the positive effects of the antifriction properties of coatings, and even lead to increased wear due to the formed abrasive particles in the friction zone.

Keywords: DLC coating, amorphous carbon, slip coefficient, wear, ceramic wear sample, polyalphaoleic oil, intermediate coating

Acknowledgements: the authors express their gratitude to Professor V.A. Levchenko (International Joint Institute of Advanced Technologies, Taizhou, China) for valuable comments and interest in the subject matter.

For citation: Buyanovsky I.A., Samusenko V.D., Shcherbakov Yu.I. Comparison of tribological properties of a DLC jointly with steel / ceramics under dry friction and boundary lubrication / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 31–39. doi: 10.30987/2223-4608-2024-31-39

Введение

Одним из наиболее эффективных методов обеспечения надёжности и высокой долговечности тяжело нагруженных узлов трения машин и механизмов является нанесение покрытий трибологического назначения на контактирующие поверхности сопряжённых деталей этих узлов [1]. К таким покрытиям относятся алмазоподобные покрытия (АПП), именуемые в англоязычной печати DLC (Diamond-Like Carbon) покрытиями, т. е. покрытиями алмазоподобным углеродом [2]. Такие покрытия успешно применяются для предохранения магнитных слоёв жёстких дисков компьютеров от износа и повреждений, в

микроэлектромеханических системах, в ответственных узлах трения машин и механизмов, в авиакосмической, автомобильной, биомедицинской, металлообрабатывающей (для покрытия режущего инструмента), и в других отраслях народного хозяйства, функционируя в широком интервале условий нагружения, как всухую, так и в смазочных средах [3, 4]. При этом DLC обладают комплексом таких важнейших характеристик, как высокая твёрдость, модуль упругости, износостойкость, низкий коэффициент трения, химическая инертность, какими не обладают другие известные твёрдые покрытия. В то же время основные физико-механические и трибологические характеристики DLC можно варьировать в достаточно

широких пределах путём направленного выбора технологии их нанесения или легируя различными элементами [5 – 7].

Предварительный выбор оптимального по трибологическим характеристикам DLC обычно производится на лабораторных машинах трения, обеспечивающих трение одноименных образцов с покрытием по одноименному образцу с тем же покрытием (DLC / DLC) [8], либо стальной образец по образцу с исследуемым покрытием (сталь / DLC), то есть изнашивающим образцом (контртелом) здесь служит сталь [9]. Учитывая разнообразие материалов, применяемых в современном машиностроении, представляет интерес определение трибологических свойств DLC в паре с различными материалами, в том числе имеющими высокую твёрдость. В предлагаемой статье такое исследование проводили на четырёхшариковой машине КТ-2 с узлом трения, модернизированным по схеме шар – три ролика, на цилиндрические поверхности которых нанесено аморфное углеродное покрытие с промежуточным слоем износостойкого покрытия алюмонитрида титана (AlTiN), обеспечивающего высокую адгезию слоя DLC к стали. Целью работы было сравнение эффективности антифрикционных и противоизносных характеристик образцов с покрытием при использовании в качестве контртела двух типов шариков: стального и керамического. Это сравнение проводили в условиях сухого трения и в среде инертного синтетического масла.

Материалы и методы

Представленная работа посвящена исследованию антифрикционных свойств углеродного алмазоподобного покрытия, нанесённого на стальные образцы. Образцы представляют собой стандартные подшипниковые ролики диаметром 8 мм из стали 100Cr6 (аналог отечественной стали ШХ-15), на цилиндрические поверхности которого для обеспечения хорошей адгезии покрытия к подложке наносят промежуточный слой алюмонитрида титана AlTiN, а поверх него слой алмазоподобного углерода общей толщины ~1,7 мкм. Методика нанесения такого покрытия подробно приведена в работе [10]. Антифрикционные свойства покрытия оценивали в процессе изнашивания его двумя типами стандартных подшипниковых шариков диаметром 12,7 мм – из стали ШХ-15 и керамического – из нитрида кремния Si₃N₄.

Оценка физико-механических характеристик образцов включала определение их нанотвёрдости и модуля упругости на нанотвердомере НаноСкан-4D. Испытания проведены в соответствии с ГОСТ Р 8.748–2011. В качестве индентора использовалась трёхгранная пирамида Берковича. Время нагружения и разгружения составляло 10 с, максимальная сила – 10 мН. Калибровку формы пирамиды и жёсткости прибора проводили на плавленом кварце. Значения этих характеристик приведены в табл. 1. Микрогеометрию поверхностей образцов оценивали на оптическом профилометре SNeox по профилю длиной 100 мкм вдоль образующей. Результаты оценки физико-механических характеристик приведены в табл. 1.

1. Физико-механические характеристики исследуемых образцов

1. Physical and mechanical characteristics of the studied samples

Образцы	Твёрдость <i>H</i> , ГПа	Модуль упругости <i>E</i> , ГПа	Параметр шероховатости <i>Ra</i> , мкм
Без покрытия	9,4 ± 1,5	250 ± 31	0,086
AlTiN	18,0 ± 2,4	264 ± 40	0,080
AlTiN + DLC	41 ± 9	440 ± 80	0,057

Триботехнические испытания проведены на разработанной в ИМАШ РАН четырёхшариковой машине трения КТ-2 с узлом трения, модернизированным по схеме вращающийся шарик – три ролика (рис. 1) [11].

Частота вращения шпинделя машины КТ-2 составляет $1,0 \text{ мин}^{-1}$. Осевая нагрузка на узел трения 110 Н. Продолжительность каждого испытания при заданной нагрузке – 60 мин. Момент трения измеряли торсионным динамометром. Графики зависимости коэффициента трения от времени испытания строились по усредненным результатам трёх повторных испытаний. После окончания каждого испытания при помощи микроскопа делаются фотографии пятен и дорожек износа, для оценки степени повреждения поверхности образцов.



Рис. 1. Модернизированная оправка (накидная гайка снята):

1 – ролик; 2 – корпус оправки; 3 – сепаратор; 4 – изнашивающий шарик

Fig. 1. Upgraded to pin (coupling nut removed):

1 – roller; 2 – toe pin body; 3 – separator; 4 – wear ball

Цикл испытаний исследуемых образцов повторяют дважды: один раз без смазочного материала (при «сухом трении»), а второй раз – при граничной смазке полиальфаолефиновым маслом ПАО-4 ($v_{100} = 4,0 \text{ мм}^2/\text{с}$). При этих испытаниях граничный режим смазки обеспечивается высокими контактными давлениями и низкой скоростью относительного перемещения верхнего шарика относительно трёх нижерасположенных цилиндрических роликов.

Трибологические испытания – результаты и обсуждение

Результаты трибологических экспериментов представлены ниже в виде зависимостей коэффициента трения от продолжительности испытаний и соответствующих микрофотографий пятен износа на роликах и дорожек износа на изнашивающих шариках.

Результаты трибологических испытаний образцов без покрытий со стальным и керамическим шарами приведены на рис. 2. При испытаниях без смазочного материала изменение коэффициента трения имеет одинаковую динамику и близкие значения, износ на роликах достаточно большой, износ стального шара также хорошо виден, износ керамического шара не ярко выражен, а на дорожке трения образовался слой из перенесённого материала ролика. При испытаниях со смазочным материалом коэффициент трения при установившемся режиме значительно снижается с 0,85 до 0,48 при стальном шаре, и до 0,19 при керамическом шаре.

Сравнение данных по трибологическим испытаниям образцов с покрытием AlTiN приведено на рис. 3. Как видно, без смазочного материала коэффициенты трения приведённых зависимостей (см. рис. 3, кривые 1 и 2) близки по динамике изменения и значениям, хотя на этапе приработки коэффициент трения выше с керамическим шаром, что возможно связано с разрушением покрытия из-за высокой твёрдости шара. В то же время, размеры пятен износа, а также дорожка износа на стальном шарике заметно различаются: достаточно чётко видно из рис. 3, что керамический шар обеспечил изнашивание исследуемого покрытия до стали в месте контакта, также на нём виден слой переноса материала. В результате разрушения покрытия мы фактически имеем трение керамический шар – сталь ШХ-15, с присутствующими абразивными частицами от разрушенного покрытия, что приводит к повышенному изнашиванию поверхности ролика.

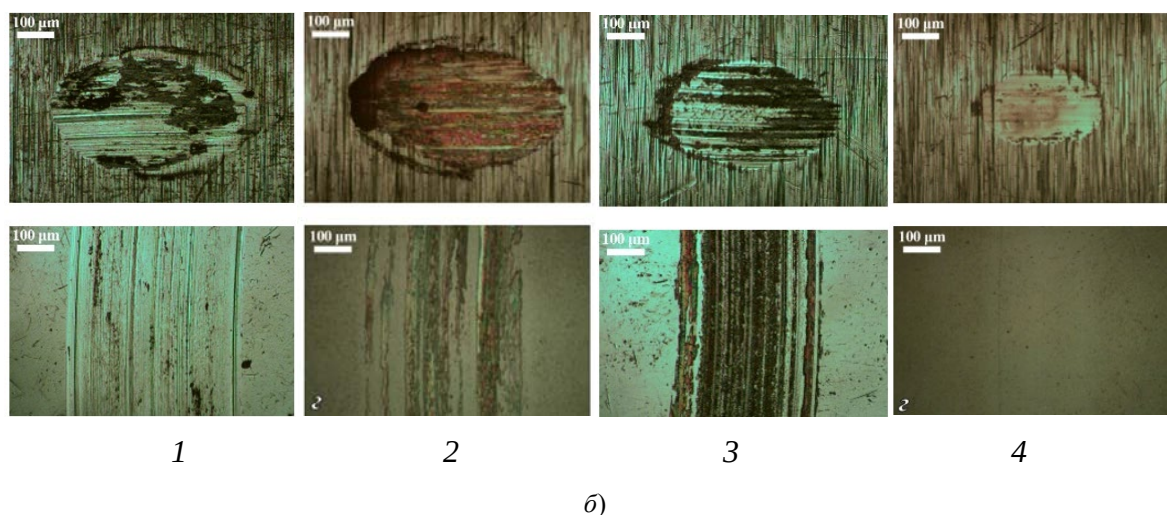
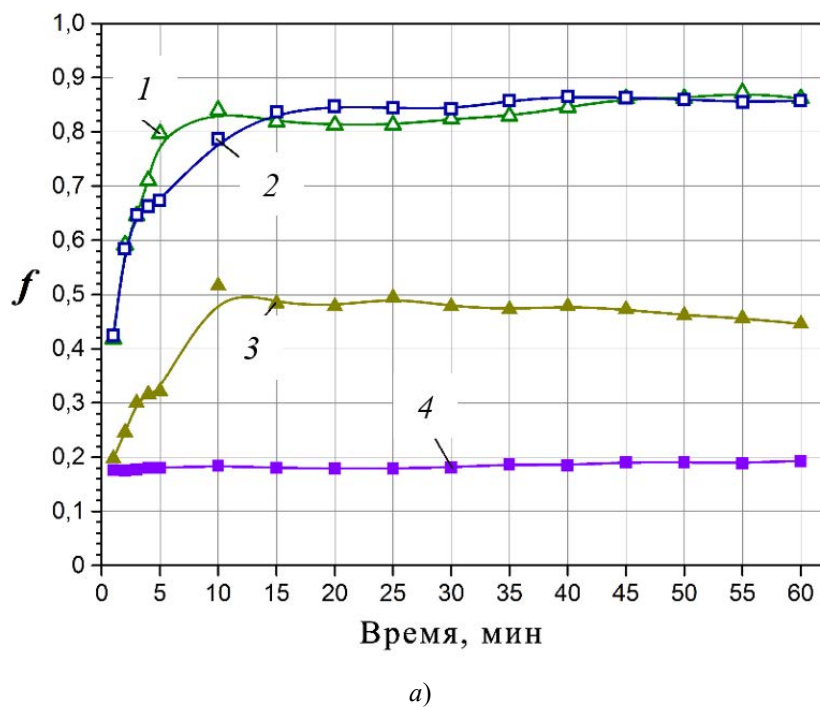


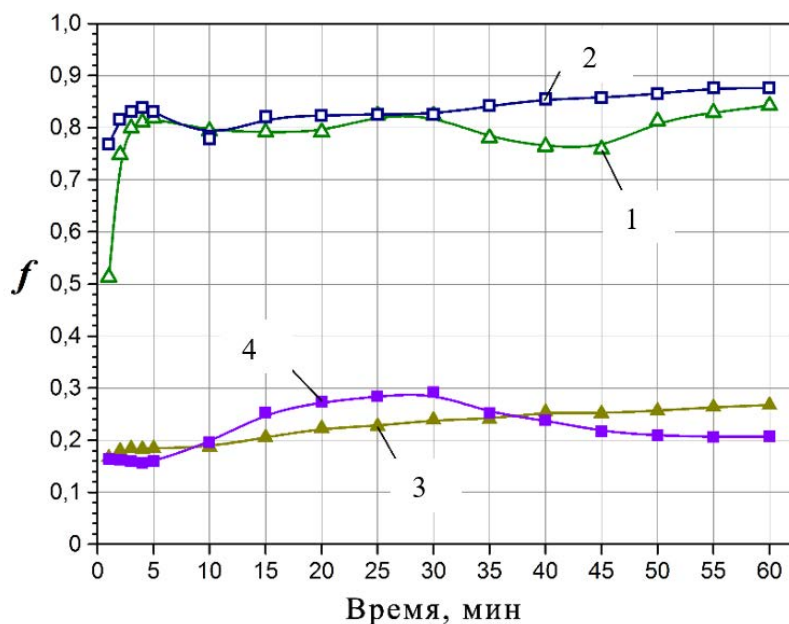
Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от времени испытаний (а) для образцов без покрытий и фоторафии (б) пятен износа (вверху) и дорожек трения на шарах (внизу) для пар трения: 1 – Ст-Ст без СМ; 2 – Кер-Ст без СМ; 3 – Ст-Ст ПАО-4; 4 – Кер-Ст ПАО-4

Fig. 2. Dependences of the slip coefficient on the test time (a) for uncoated samples and photographs (b) of wear spots (top) and friction tracks on the balls (bottom) for friction pairs:

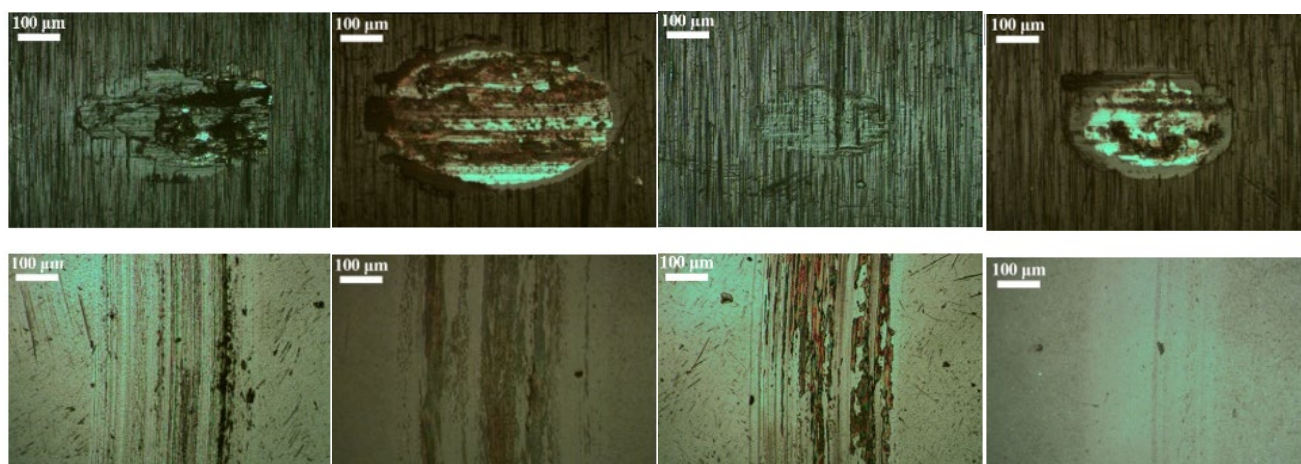
1 – St-St without SM; 2 – Cer-St without SM; 3 – St-St PAO-4; 4 – Cer-St PAO-4

Результаты испытаний AlTiN покрытия в смазочной среде ПАО-4 (см. рис. 3, кривые 3 и 4) показывают, что наличие даже инактивной смазочной среды заметно улучшает антифрикционные свойства пары трения и уменьшает размер пятна износа, как при изнашивании стальным шариком, так и при изнашивании керамическим шариком, хотя покрытие всё равно разрушается, хоть и в меньшей

степени. Коэффициент трения при испытании со стальным шаром постепенно возрастает по мере повреждения покрытия, при испытании с керамическим шаром коэффициент трения имеет более сложную зависимость от времени, с ростом до 30 мин, после чего происходит снижение, что вероятно связано с процессом разрушения покрытия.



a)



b)

Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от времени испытаний (a) для образцов с покрытием AlTiN и фоторафии (б) пятен износа (вверху) и дорожек трения на шарах (внизу) для пар трения: 1 – Ст-AlTiN без СМ; 2 – Кер-AlTiN без СМ; 3 – Ст-AlTiN ПАО-4; 4 – Кер-AlTiN ПАО-4

Fig.3. Dependences of slip coefficient of friction on the test time (a) for AlTiN coated samples and photographs (b) of wear spots (top) and friction tracks on balls (bottom) for friction pairs:

1 – St-AlTiN without SM; 2 – Cer-AlTiN without SM; 3 – St-AlTiN PAO-4; 4 – Cer-AlTiN PAO-4

Результаты испытаний покрытия AlTiN + DLC показаны на рис. 4. Керамический шар также изнашивает это покрытие, в результате постепенного изнашивания покрытия мы видим, как это отображается в постепенном росте коэффициента трения в процессе испытания, как без смазочного материала (см. рис. 4, кривая 2), так и в среде

ПАО-4 (см. рис. 4, кривая 4). Стальной шар не изнашивает значительно покрытие за время испытания и коэффициент трения остается постоянным (см. рис. 4, кривые 1 и 3), после завершения этапа приработки, по значениям коэффициента трения без смазочного материала немного выше, чем с ПАО-4.

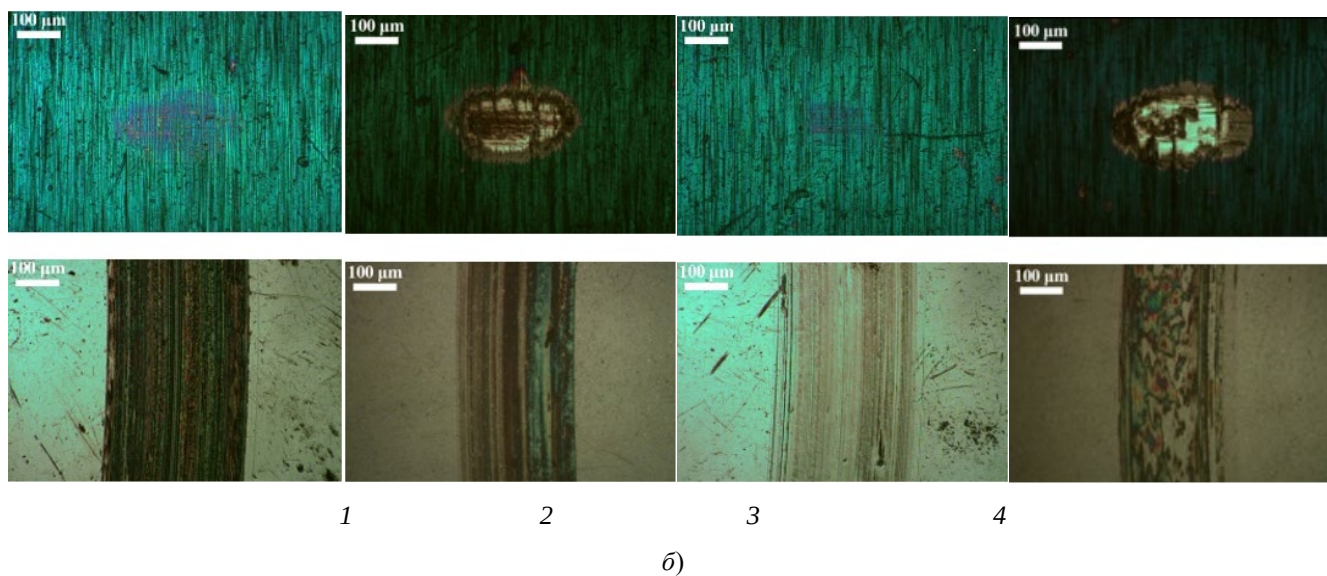
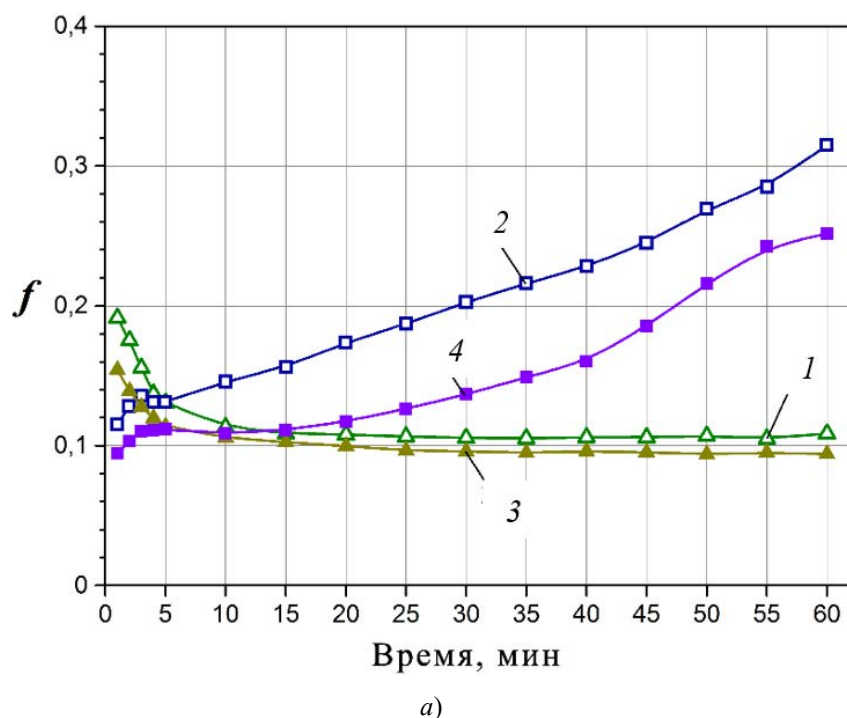


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения от времени испытаний (а) для образцов с покрытие AlTiN+DLC и фоторафии (б) пятен износа (вверху) и дорожек трения на шарах (внизу) для пар трения: 1 – Ст-AlTiN+DLC без СМ; 2 – Кер-AlTiN+DLC без СМ; 3 – Ст-AlTiN+DLC ПАО-4; 4 – Кер-AlTiN+DLC ПАО-4

Fig. 4. Dependences of slip coefficient on the test time (a) for samples coated with AlTiN+DLC and photographs (b) of wear spots (top) and friction tracks on the balls (bottom) for friction pairs: 1 – Ct-AlTiN+DLC without SM; 2 – Cer-AlTiN+DLC without SM; 3 – Ct-AlTiN+DLC PAO-4; 4 – Cer-AlTiN+DLC PAO-4

Рассмотренные выше результаты измерения пятен износа на исследованных образцах в процессе проведения оценки

антифрикционных свойств рассмотренных трибосопряжений сведены в виде столбчатой диаграммы на рис. 5.

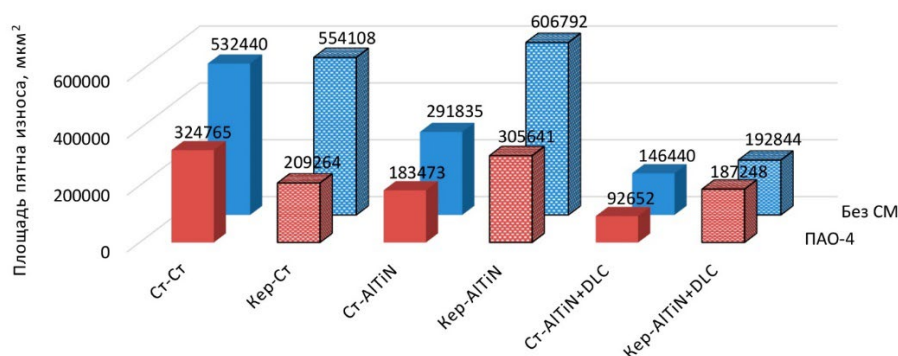


Рис. 5. Диаграмма значений площадей пятен износа на роликах

Fig. 5. Diagram of the values of the areas of wear spots on the rollers

Таким образом, гистограммы площадей пятен износа на роликах позволяют установить, что максимальные площади пятен износа были получены при трении без смазочного материала стального и керамического шариков по стальному ролику, и керамического шарика по ролику с покрытием AlTiN. По-видимому, это объясняется тем, что при трении стали по стали происходит заметное схватывание между поверхностями, а при трении с керамическим шариком более твёрдый материал эффективно изнашивает стальной ролик, при трении же керамического шарика по покрытию AlTiN в результате разрушения этого покрытия его частицы оказывают дополнительное абразивное действие в контакте, что приводит к увеличению износа (см. рис. 3, б, поз. 2). При нанесении на покрытие AlTiN тонкого слоя DLC ситуация заметно изменяется: резко снижается износ покрытия при изнашивании как стальным, так и керамическим шариками. Наконец, смазывание рабочих поверхностей контактирующих образцов приводит к значительному снижению износа поверхности всех образцов. Хотя по-прежнему, при изнашивании в режиме граничной смазки наибольшие износы для этих пар трения наблюдаются в парах трения сталь – сталь, сталь – керамика и AlTiN – керамика.

Заключение

Нанесение дополнительного слоя алмазоподобного покрытия, как видно из рис. 4,

обеспечило больший антифрикционный и противоизносный эффект, чем наблюдался на рис. 2 от применения смазочной среды при испытаниях со стальным шаром. При наличии покрытия AlTiN + DLC в паре со сталью смазывание маслом ПАО-4 почти не влияет на антифрикционные и противоизносные характеристики пары трения, лишь незначительно снижая износ образцов, за счёт разделения их граничной смазочной пленкой.

Смазочный материал ПАО-4 смягчает условия трения, что сказывается на снижении коэффициента трения и износе образцов. Однако, в случае с керамическим контртелом это является недостаточным для предотвращения разрушения покрытия.

При трении керамического шара по исследуемым покрытиям во всех случаях происходит разрушение покрытий. По-видимому, при тяжёлом режиме граничной смазки пару трения керамика – AlTiN + DLC следует применять с осторожностью, поскольку керамическое контртело может интенсивно изнашивать защитное покрытие даже в смазочной среде. Разрушение покрытия будет приводить к образованию твёрдых абразивных частиц, и усиливать изнашивание деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Албагачиев А.Ю. Трибологические свойства эффективных покрытий деталей машин и режущего инструмента. В кн.: Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин / Отв. ред. Г.В.Москвитин. М.: ЛЕНАНД, 2019. С. 55–72.
2. Donnet C., Erdemir A. (ed.). Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media, 2007. 664 c.

3. Hauer R. An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications // Tribology International. 2004. T. 37. №. 11-12. С. 991–1003.

4. Kalin M. et al. Review of boundary lubrication mechanisms of DLC coatings used in mechanical applications // Meccanica. 2008. T. 43. С. 623–637.

5. Tyagi A. et al. A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications // International journal of refractory metals and hard materials. 2019. T. 78. С. 107–122.

6. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films – From first experiments to worldwide applications // Surface and Coatings Technology. 2014. T. 242. С. 214–225.

7. Семёнов А.П. Трибологические свойства и вакуумно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 1. С. 83–102.

8. Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Левченко В.А. Использование нитрида титана и алюмонитрида титана как промежуточных слоёв для алмазоподобных покрытий // В кн.: Триботехника-машиностроению: Труды XII Международной конференции. М.: ИМАШ РАН. 2020. С. 58–62.

9. Zahid R. et al. Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: a review // Tribology Letters. 2015. T. 58. С. 1–28.

10. Левченко В.А. и др. Антифрикционные свойства алмазоподобного покрытия и алюмонитрида титана в модельных смазочных средах // Трение и износ. 2019. Т. 40. № 6. С. 706–711.

11. Матвеевский Р.М. Методы и аппаратура для оценки триботехнических свойств смазочных материалов // В кн.: Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник. М.: Машиностроение. 1989. С. 20–47.

12. Буяновский И.А., Хрушов М.М., Самусенко В.Д. Алмазоподобные углеродные покрытия: трибологическое поведение при граничной смазке. Ч. 1. Структура, методы испытаний, смазка адсорбционным слоем // Материаловедение. 2021. № 9. С. 3–18.

REFERENCES

1. Albogachiev A.Y. Tribological properties of effective coatings of machine parts and cutting tools. In the book: Promising methods of surface treatment of machine parts / Publ. ed. G.V. Moskvitin. Moscow: LENAND., 2019, pp. 55–72.

2. Donnet C., Erdemir A. (ed.). Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications. Springer Science & Business Media, 2007. 664 c.

3. Hauer R. An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications // Tribology International. 2004. T. 37. №. 11-12. С. 991–1003.

4. Kalin M. et al. Review of boundary lubrication mechanisms of DLC coatings used in mechanical applications // Meccanica. 2008. T. 43. С. 623–637.

5. Tyagi A. et al. A critical review of diamond like carbon coating for wear resistance applications // International journal of refractory metals and hard materials. 2019. T. 78. С. 107–122.

6. Bewilogua K., Hofmann D. History of diamond-like carbon films – From first experiments to worldwide applications // Surface and Coatings Technology. 2014. T. 242. С. 214–225.

7. Semenov A.P. Tribological properties and vacuum-plasma methods for obtaining diamond and diamond-like coatings // Friction and wear, 2009, vol. 30, no. 1, pp. 83–102.

8. Buyanovsky I.A., Samusenko V.D., Levchenko V.A. The use of titanium nitride and titanium aluminide as intermediate layers for aluminum-like coatings // In the book: Tribotechnika-mashinostroyeniye: Proceedings of the XII International Conference. Moscow: IMASH RAS, 2020, pp. 58–62.

9. Zahid R. et al. Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: a review // Tribology Letters. 2015. vol. 58. pp. 1–28.

10. Levchenko V.A. et al. Antifriction properties of diamond-like coating and aluminidatitan in model lubricant media // Friction and wear, 2019, vol. 40, no. 6, pp. 706–711.

11. Matveevsky R.M. Methods and equipment for evaluating tribotechnical properties of lubricants // In the book: Lubricants: antifriction and anti-wear properties. Test methods: Handbook. Moscow: Mashinostroyeniye, 1989, pp. 20–47.

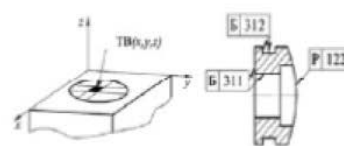
12. Buyanovsky I.A., Khrushchev M.M., Samusenko V.D. Diamond-like carbon coatings: tribological behavior in boundary lubrication. Part 1. Structure, test methods, lubrication with an adsorption layer // Materials science, 2021, no. 9, pp. 3–18.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.03.2024; одобрена после рецензирования 22.03.2024; принята к публикации 28.03.2024

The article was submitted 16.03.2024; approved after reviewing 22.03.2024; assepted for publication 28.03.2024



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №5 (155). С.40-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №5 (155). P.40-48.

Научная статья
УДК 629.4.023.142:624.078.8+621.791
doi: 10.30987/2223-4608-2024-40-48

Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств сопрягаемых поверхностей элементов сборной формообразующей оснастки с учетом установленной долговечности пресс-форм

Евгений Александрович Польский¹, к.т.н.
Роман Владимирович Абрамов², инженер

^{1, 2} *Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия*

¹ polski.eugene@hotmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-9214-7567>

² abramow-roma1995@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7670-0159>

Аннотация. Рассматриваются конструкторско-технологические мероприятия на этапах проектирования, изготовления и сборки по обеспечению требуемых показателей надежности (долговечности) элементов пресс-форм. Приводятся рекомендации для нормирования и достижения параметров точности и качества сопрягаемых поверхностей с учетом формирования необходимых эксплуатационных свойств на основных этапах жизненного цикла изделия. Выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на обеспечение правильного и точного расположения формообразующих элементов. Представлена концепция определения фактической площади контакта, и расчета масштабного коэффициента, обеспечивающего уточнение величины контактных сближений сопрягаемых поверхностей. Обозначена гипотеза формирования показателей надежности с учетом технологических и технических возможностей производства с введением корректировки верхнего и нижнего отклонений размеров, входящих в размерные цепи и обеспечивающие установленные параметры точности замыкающего звена.

Проведен анализ условий эксплуатации исследуемого типа элементов пресс-форм. Выявлены и проанализированы основные эксплуатационные свойства, обеспечивающие требуемую наработку на отказ формообразующих деталей. Особое внимание уделено исследованию конструктивных особенностей таких деталей, проведено сравнение цельной и сборной конструкции, а также, для наиболее перспективной последней, проведен расчет контактных напряжений при выполнении сборочной операции для моделирования величины контактных сближений. Это позволит для любого типа сборной формообразующей оснастки разработать практические рекомендации по нормированию основных механических свойств, показателей точности, включая допуски отклонений от правильной геометрической формы, и параметров качества поверхностного слоя на этапе проектирования, назначения методов и режимов обработки на этапах изготовления и контроля, а также предложить величину статического нагружения при сборке.

Ключевые слова: долговечность, качество поверхности, погрешности формы и взаимного расположения поверхностей, механическая и абразивная обработка, эксплуатационные свойства

Для цитирования: Польский Е.А., Абрамов Р.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств сопрягаемых поверхностей элементов сборной формообразующей оснастки с учетом установленной долговечности пресс-форм // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 5 (155). С. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-40-48

Engineering support of mating surfaces operational properties in the compound forming tool elements with regard to specified pressmold life

Evgeny A. Polsky¹, Ph.D. Eng.

Roman V. Abramov², engineer

^{1,2} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ polski.eugene@hotmail.com

² abramow-roma1995@yandex.ru

Abstract. Design and technological concepts are viewed at the stages of designing, manufacturing and joining process providing for the required reliability (durability) of mold elements. Recommendations are given for rationing and achieving the parameters of accuracy and quality of mating surfaces, taking into account the formation of the necessary operational properties at the main stages of the product life cycle. The factors that have the greatest impact on ensuring the correct and accurate location of forming tool elements have been elicited. The concept of determining the actual contact area and calculating the scale parameter, which provides a contact interface degree specification for conjugated surfaces, is presented. The hypothesis of the formation of reliability indicators is found, taking into account the manufacturing capability and technical capacity of production with the introduction of correction of the upper and lower dimensional deviations included in the dimension chains and ensuring the pre-set accuracy parameters of the master link.

The analysis of the operating conditions of the studied type of pressmold elements is carried out. The main operational properties that provide the required operating time for shaping part failures are identified and analyzed. Special attention is paid to the study of the structural features of such parts, a comparison of the integral and prefabricated structures is made, and also, contact stresses under the joining operation for the most promising of the latter are calculated for contact interface degree simulation. This will allow developing practical recommendations for any type of compound forming tool for the benefit of basic mechanical properties rate making, accuracy indicators, including deviation allowances in the correct geometric shape, including quality parameters of the surface layer at the designing stage, processing methods dispatch and modes setting at the manufacturing and testing stages and also suggesting the amount of static loading when assembling.

Keywords: reliability (service life), surface quality, poor shape precision and geometric relationship of surfaces, machining and abrasion, operational properties

For citation: Polsky E.A., Abramov R.V. Engineering support of mating surfaces operational properties in the compound forming tool elements with regard to specified pressmold life / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 5 (155). P. 40–48. doi: 10.30987/2223-4608-2024-40-48

Для обеспечения передачи как управляющих сигналов, так и требуемого питания на радиоэлектронные приборы применяют многотырьковые соединители. Одним из основных этапов получения качественных соединителей является формирование

диэлектрического корпуса и штекера с отверстиями для размещения контактов. От того, с какой точностью получены сопрягаемые при контакте поверхности, зависит важнейший показатель работоспособности таких элементов как стабильность контакта (рис. 1).

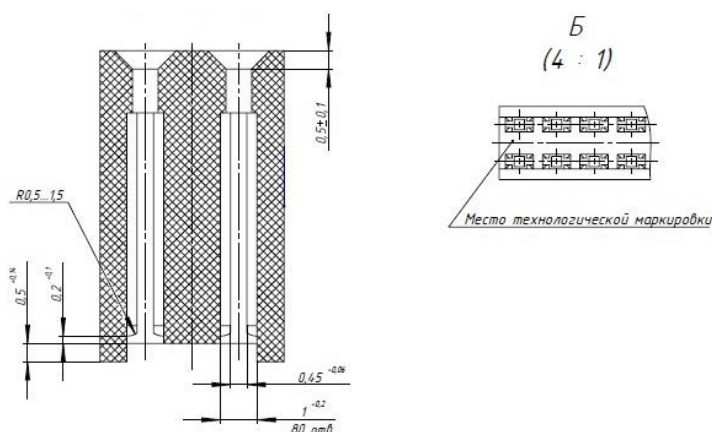


Рис. 1. Фрагмент чертежа изолятора

Fig. 1. Subpicture of insulator draft

Элементы соединителей изготавливают методом спекания на термопластавтоматах. В настоящее время на практике применяют два основных варианта изготовления элементов формообразующей оснастки: единое изделие, получаемое вырезкой на электроэрозионном оборудовании с последующей отделочной обработкой на профилешлифовальном оборудовании и на слесарных операциях ручной доводкой для достижения параметров точности и

качества поверхностей (рис. 2, а), а также в виде сборной конструкции, состоящей из отдельных «знаков», формирующих элемент получаемой детали (рис. 2, б). Оба варианта имеют свои достоинства и недостатки. Сборная конструкция, в отличие от цельной детали, обеспечивает самые благоприятные условия для выхода воздуха при замыкании штампа, что положительно сказывается на качестве получаемой детали.

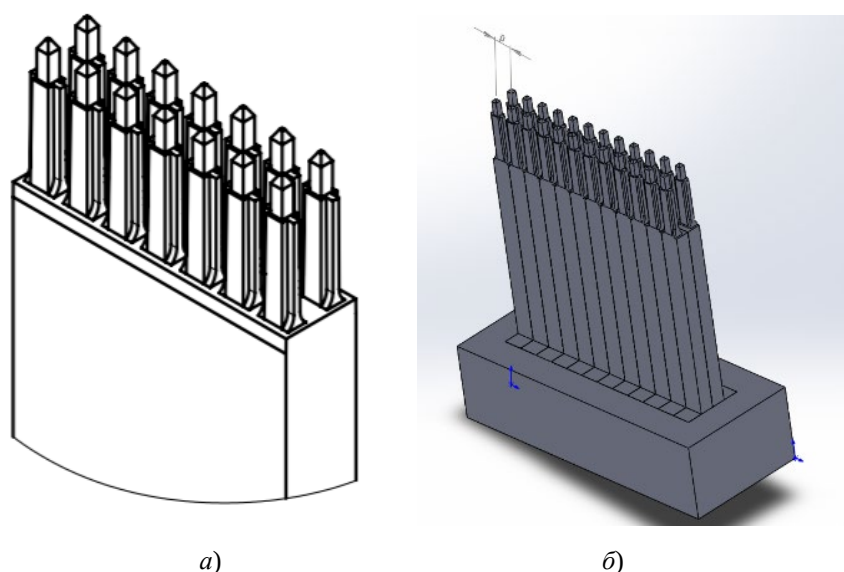


Рис. 2. Виды элементов формообразующей оснастки:
а – цельная гребенка; б – сборная конструкция гребенки

Fig. 2. Types of forming tool elements:
a – one-piece comb; b – prefabricated comb structure

Показатели надежности формообразующей оснастки зависят от множества факторов (трение между формообразующими поверхностями, коррозии от высокой температуры и взаимодействия с агрессивной средой химических элементов) при которых происходит не только износ поверхностей формообразующих деталей, но и взаимное смещение их вершин. В результате чего происходит ухудшение качества поверхности изделия, увеличение параметров шероховатости, изменение размеров, следствием чего в детали образуются трещины, заливки материала в виде гребешков. Пресс-форма также выходит из строя из-за налипания и привара материала к формообразующим поверхностям, возникновению на них вмятин [1]. Указанные многочисленные дефекты делают невозможным дальнейшую эксплуатацию

пресс-формы и требуют ее ремонта или замены на новую.

При проектировании сборной оснастки необходимо учитывать базовый принцип взаимозаменяемости – возможность быстрой замены вышедшего из строя знака на элемент, изготовленный по требованиям чертежа. Однако, учитывая высокие требования по точности расположения вершин знаков в сборочной единице, в производстве в основном применяют методы регулировки и пригонки сопрягаемых поверхностей. Данные методы выполняются вручную высококвалифицированным персоналом, что увеличивает стоимость работ до 80 % от стоимости всей формообразующей оснастки [2].

Обеспечение точности расположения каждого звена в составе формообразующей

оснастки является основной задачей в процессе сборочной операции. Трудоемкость сборочных работ обуславливается проявившимися погрешностями каждого звена, в связи с этим необходима оптимизация процесса сборки с учетом возникающих контактных взаимодействий для обеспечения точности сборки и снижения себестоимости выпускаемой продукции.

Таким образом, технологическое обеспечение требуемых точности и качества формообразующей оснастки пресс-форм для сборочных операций с учетом влияния контактной жесткости и корректировкой параметров обработки и предельных отклонений при проектировании с последующим снижением трудоемкости выполненных работ является актуальной задачей [3].

Показатели надежности формообразующей оснастки пресс-форм оказывают основное

влияние на получение качественной продукции. Главной особенностью применяемой оснастки для получения многоштырьковых разъемов является применение сборных конструкций, включающих набор отдельных элементов – знаков, установленных в корпус коробчатой конструкции.

Качество поверхности и вид соединения деталей играют большую роль в работе пресс-формы. Основным фактором, влияющим на качество изделия, является шероховатость поверхности. Обработка формообразующих поверхностей должна обеспечиваться с шероховатостью не более $Ra = 1,0$ мкм. Для уменьшения износа и для сокращения времени извлечения изделия, оформляющие поверхности формообразующих элементов подвергаются хромированию, и должны быть изготовлены с допуском не более $0,01$ мм (рис. 3).

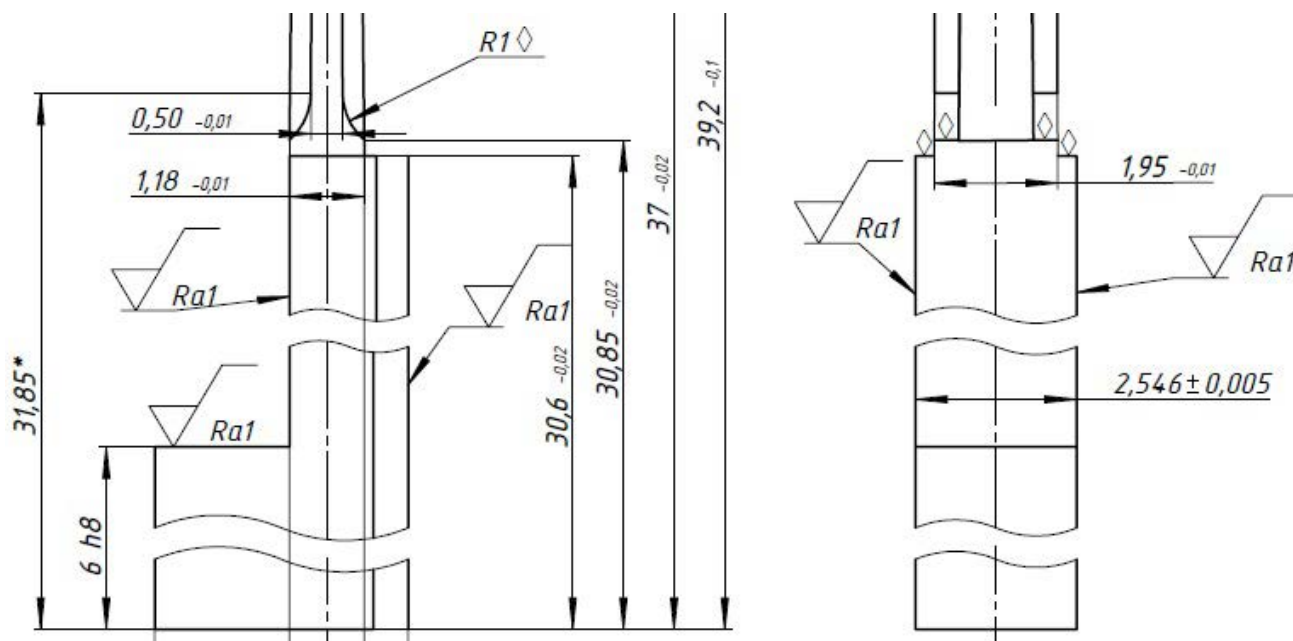


Рис. 3. Фрагмент чертежа знака сборной формообразующей оснастки

Fig. 3. Subpicture of the draft of the compound forming tool sign

Для исследуемого объекта используется марка конструкционного материала Сталь 95Х18 ГОСТ 103-2006. Данная марка соответствует основным критериям обеспечения долговечности при эксплуатации. Материал относится к группе легированных сталей мартенситного класса с высоким содержанием хрома. Изделие из данного материала

устойчиво к воздействию химически агрессивных сред и абразивного износа.

Требуемую точность формообразующих поверхностей получают фрезерованием и электроэрозионной координатно-прошивочной обработкой. После предварительной обработки выполняются плоское, профильное и оптическое шлифование поверхностей. Чтобы

достичь шероховатость поверхности порядка $Ra = 0,1 \dots 0,15$ мкм производится полировка рабочих поверхностей, требующих введение ручной обработки на слесарно-сборочных операциях.

Для сборной конструкции оснастки добавляется операция сборки, для которой требуется регламентировать как последовательность

комплектования гребенки маркированными знаками, так и усилие закрепления всех элементов. В настоящее время на предприятиях решают эту задачу переходом от принципа взаимозаменяемости к формированию неразъемного соединения знака и корпуса сваркой (рис. 4).

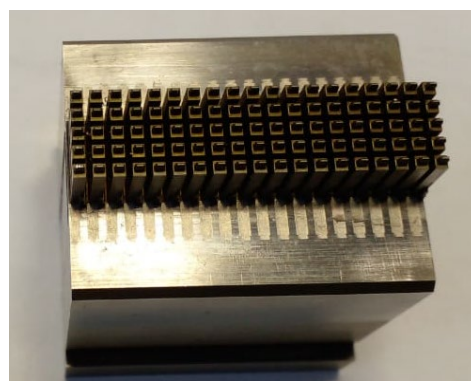
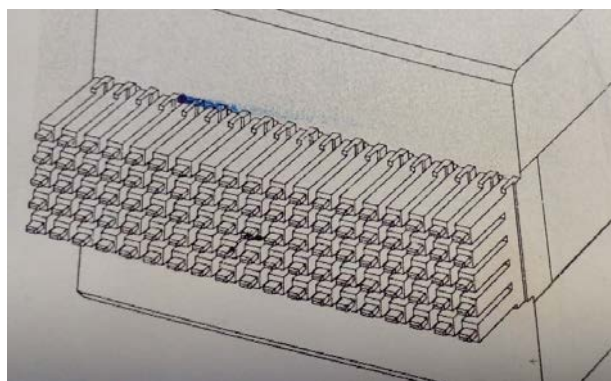
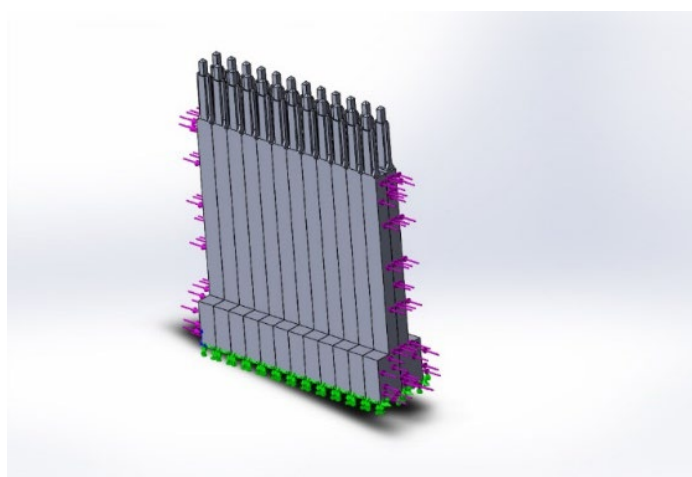


Рис. 4. Конструкторская схема сварки и внешний вид изделия после сборки

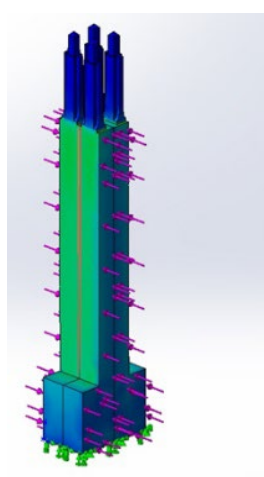
Fig. 4. Design welding scheme and appearance of the product after assembly

При выполнении сборки основным эксплуатационным свойством, влияющим на смещение вершин знаков, и, соответственно, формирующим показатели надежности узла является контактная жесткость [4]. Представляется целесообразным смоделировать процесс

сборки с выявлением концентрации и распределения нагрузки от силового механизма (рис. 5, а). Базовым допущением расчетной схемы вводим возможность анализа контактных деформаций в парах знаков с последующим суммированием (рис. 5, б).



а)



б)

Рис. 5. Контактные деформации, возникающие на стыке контактирующих знаков при сборке: а – общая схема сборочной единицы; б – допущение расчетной схемы

Fig. 5. Contact deformations that occur at the junction of the contact marks when joining: а – general scheme of the assembly unit; б – the design scheme allowance

Для этапов финишной обработки необходимо выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование параметров точности (включая параметры макроотклонений) и качества контактирующих (базовых) поверхностей с целью определения и прогнозирования величины контактных деформаций в зоне стыка, что с учетом накопленных

перемещений от первого знака к последнему позволит скорректировать предельные отклонения на исполнительные размеры [5]. В частности, в работах Суслова А.Г. приведены зависимости по расчету контактных перемещений для однократного и многократного нагружения [6]:

$$j_i = p_H / \left(\sum_{i=1}^2 B \cdot \left(1.2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{инст\ i} / 5) \cdot C_i \cdot \left(\frac{S_i}{10^3} \right)^y V_i^n \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх\ i} - Wz_{исх\ i} \right)^x \right) \cdot H_{max\ i}}{H_{\mu 0i}} \right)^{1/3} \right) + \rightarrow$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^2 2\pi \cdot \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} H_{\mu 0i} S_{mi} \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^2 B \cdot \left(1.2 \cdot \frac{(G_i + Rz_{инст\ i} / 5) \cdot C_i \cdot \left(\frac{S_i}{10^3} \right)^y V_i^n \cdot \left(\left(\frac{t_i}{10^3} \right)^x - \left(\frac{t_i}{10^3} - Rz_{исх\ i} - Wz_{исх\ i} \right)^x \right) \cdot H_{max\ i}}{H_{\mu 0i}} \right)^{1/3}}{G_i + Rz_{инст\ i} / 5} \right)$$

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 4287-2014 «Геометрические характеристики изделий» и ГОСТ 24642-81, отклонение от плоскостности – это наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до прилегающей плоскости в пределах нормируемого участка: следовательно, можно волнистость конструктора рассматривать, как часть отклонения от плоскостности. Коэффициент ε зависит от наибольшего размера контактной поверхности l , а также от разности $\Delta_0 = \Delta - W_{max}$ допуска плоскостности Δ и наибольшей высоты волны волнистой шероховатой поверхности W_{max} или по выше указанному ГОСТ – параметр R_{max} .

Расчетная модель поверхности с макроотклонением формы можно представить в виде шероховатого волнистого клина (рис. 6) шириной B , взаимодействующий с абсолютно жестким полупространством. Примем, тело клина абсолютно жесткое, а контактный слой, податливый и деформируемый согласно зависимости $\delta = c\sigma^{0.5}$ [7]. Необходимо разделить понятие протяженной поверхности со своей моделью влияния отклонений от плоскостности и

прямолинейности образующей, ограниченной пятью базовыми длинами (с учетом допущения требований по пространственным отклонениям деталей нормальной точности – не более 60 % от допуска на размер) (рис. 6, а) и более пяти базовых длин (рис. 6, б).

Первому случаю будет соответствовать модель контакта сопрягаемых поверхностей знаков между собой, а второму случаю – модель контакта знака с корпусом. Тогда $\delta = (3c^2\sigma\Delta_0)^{1/3}$.

Формы профиля порождаются особенностями метода обработки поверхности. Поэтому в вопросах определения контактной жесткости первостепенную роль играют технологические методы обработки. Величины радиусов вершин микровыступов в разных сечениях детали оказываются различными и в весьма сильной степени зависят от расположения плоскости измерения по отношению к направлению следов обработки. При шлифовании радиусы закруглений в продольном направлении оказываются большими в 10 – 100 раз, чем в поперечном, при точении – в 10 – 30 раз, при фрезеровании и

строгании – в 5 – 20 раз. При полировании и доводке следы не имеют определенной

ориентации. Для расчетов приходится усреднять величины радиусов [8].

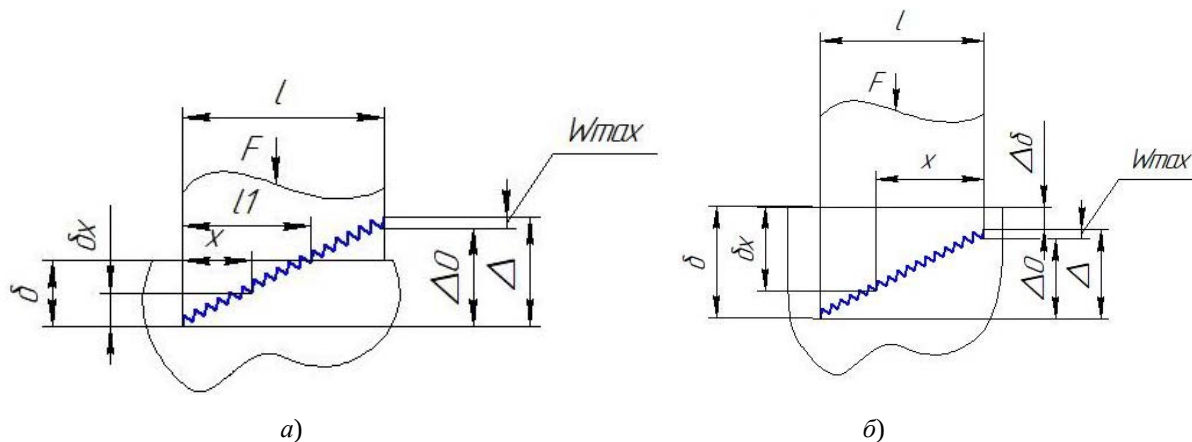


Рис. 6. Расчетная модель поверхности с макроотклонениями формы:

а – величина длины контакта не более пяти базовых длин; б – величина длины контакта более пяти базовых длин

Fig. 6. The design model of the surface with macro-deviations in the shape:

а – the value of the contact length is no more than five base lengths; б – the value of the contact length is more than five base lengths

В работе [9] представлена методика проведения размерно-точностного анализа деталей узлов с учетом влияния эксплуатационных свойств. На основе этого расчета представляется возможным расчет предельных отклонений размеров, обеспечивающих точность замыкающего звена и прогнозирование изменения размеров размерной цепи с учетом влияния условий сборки. Предполагается провести предварительный расчет коэффициентов $k_{\text{внут}}$ и $k_{\text{внеш}}$, представляющих собой величины, определяющие значения эксплуатационных свойств контактирующих поверхностей с учетом параметров механических свойств материалов $k_{\text{внут}}$ и параметров качества поверхности $k_{\text{внеш}}$.

В соответствии с предложенным выше принципом представления дополнительных звеньев контактной жесткости в виде

$$\sum_k^l c_k k_{\text{внут}_k} k_{\text{внеш}_k} k_{\delta_k} k_{T_{\text{эк}_k}} \text{ можно сделать следующие замечания:}$$

- коэффициент передаточного отношения c_k будет зависеть от конструктивного оформления сборки и положения сопряжений в ней;
- коэффициент $k_{\text{внеш}}$ можно выделить из полученных выше зависимостей для соответствующих типов сопряжений (нагрузочно-

скоростные характеристики, размеры сопряжений a , b , α_0 и др.);

– коэффициент $k_{\text{внут}}$, который характеризует влияние внутренних факторов также присутствует в этих зависимостях в виде коэффициентов k_i , определяющих особенности сопряжений (направление действия вектора силы, пространственное распределение волнистости и шероховатости).

Представленная методика позволяет непосредственно рассчитать коэффициент контактной жесткости, зная условия обработки [10]. Решение обратной задачи позволяет определить методы и режимы обработки, позволяющие обеспечить требуемые значения контактной жесткости. Все проведенные расчеты определяют коррекцию верхнего и нижнего отклонений размеров сопрягаемых деталей.

Для решения научной проблемы обеспечения установленных показателей долговечности и наработки узла на отказ при реализации этапов жизненного цикла изделия – проектирование, изготовление и сборка, требуется проведение расчетов весовых коэффициентов. Коэффициенты, включающие в себя механические свойства материала и параметры качества поверхностного слоя, позволят выполнить корректировку или определение допуска, верхнего и нижнего отклонений размеров размерной

цепи, формирующей точность замыкающего звена. При этом основным критерием выбора и расчета показателей надежности узла является установление значимости влияния преобладающего эксплуатационного свойства в элементарном прототипе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Вайнер Л.Г. Методологические основы диагностики технологических систем металлообработки по параметрической надежности обеспечения заданного качества обрабатываемых поверхностей // Вестник Брянского государственного технического университета. 2021. № 11(108). С. 49–63. DOI 10.30987/1999-8775-2021-11-36-50. EDN KCWBUK.
2. Польский Е.А., Никонов О.А., Митраков Н.С., Звягинцев Ф.Д. Технологическое обеспечение точности наукоемких сборочных узлов на этапах жизненного цикла // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 8-2. С. 328–335. EDN ZHTRKV.
3. Polsky E.A., Sorokin S.V., Shemenkov V.M. Technological support of joint reliability indicators taking into account complex formation of surface quality metrics and physical and mechanical properties of functional surface materials // Journal of Physics: Conference Series, Divnomorskoe, 31 мая 06 2021 года. Divnomorskoe, 2021. P. 052024. DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052024. EDN DBQWMA.
4. Федукон А.Г., Хандожко А.В., Польский Е.А., Щербакон А.Н. Обеспечение точности станочных узлов на базе унифицированных модулей с учетом контактной жесткости стыков // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 3 (76). С. 51–59. DOI 10.30987/article_5c3db11190a975.91435272. EDN VXQNEC.
5. Сулов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. и др. Фундаментальные основы технологического обеспечения и повышения надежности изделий машиностроения М.: Издательство «Инновационное машиностроение», 2022. 552 с. ISBN 978-5-907523-04-3. EDN DCEFZK.
6. Сулов А.Г., Федонин О.Н., Петрешин Д.И. Фундаментальные основы обеспечения и повышения качества изделий машиностроения и авиакосмической техники // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 2 (87). С. 4–10. DOI 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-4-10. EDN OGAOCD.
7. Иванов А.С. Расчет Справочные контактной деформации при конструировании машин/ А.С. Иванов, В.В. Измайлов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2006. № 8. С. 37–42.
8. Сулов А.Г., Федонин О.Н., Польский Е.А. Наукоемкая технология повышения качества сборочных единиц машин на этапах жизненного цикла //

Наукоемкие технологии в машиностроении. 2016. № 5(59). С. 34–41. EDN VZJWYX.

9. Польский Е.А., Сорокин С.В. Повышение надежности изделий машиностроения за счет совершенствования точностного анализа размерных цепей // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2022. № 6 (132). С. 38–48. DOI 10.30987/2223-4608-2022-6-38-48. EDN FUGZAP.

10. Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Смоленцев Е.В., Ковалева Е.В., Анализ процессов формирования микропрофиля поверхностей деталей машин на этапах обработки и приработки в условиях граничного трения // Транспортное машиностроение. 2023. № 9 (21). С. 24–36. DOI 10.30987/2782-5957-2023-9-24-36. EDN DWSBDH.

REFERENCES

1. Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Weiner L.G. Methodological foundations of diagnostics of metalworking technological systems according to parametric reliability of ensuring a given quality of treated surfaces // Bulletin of the Bryansk State Technical University, 2021, no. 11(108). pp. 49-63. DOI 10.30987/1999-8775-2021-11-36-50. EDN KTSUBUK.
2. Polsky E.A., Nikonov O.A., Mitrakov N.S., Zvyagintsev F.D. Technological provision of accuracy of scientific assembly at stages of life cycle // News of TulGU. Technical science. 2017, no. 8. pp. 328–338. UVD YARIKOM.
3. Polsky E.A., Sorokin S.V., Shemenkov V.M. Technological support of joint reliability indicators taking into account complex formation of surface quality metrics and physical and mechanical properties of functional surface materials // Journal of Physics: Conference Series, Divnomorskoe, 31st, May, 06, 2021 year. Divnomorskoe, 2021. P. 052024. DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052024. EDN DBQWMA.
4. Fedukon A.G., Khandozhko A.V., Polsky E.A., Shcherbakov A.N. Ensuring the accuracy of machine-tool assemblies based on unified assemblies based on the contact stiffness of the joints // BSTU Bulletin. Mechanical Engineering, 2019, no. 3, pp. 51–59. DOI 10.30987/article_5c3db11190a975.91435272. EDN VXQNEC.
5. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A. and others. Fundamentals of technological support and reliability improvement of mechanical engineering articles. Moscow: Publishing House «Innovatsionnoe mashinostroenie», 2022, 552 p. ISBN 978-5-907523-04-3. EDN DCEFZK.
6. Suslov A.G., Fedonin O.N., Petrishin D.I. Basic fundamentals to ensure and increase quality of mechanical engineering and aerospace products. BSTU Bulletin. 2020, no.2(87), pp. 4–10. <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2020-2020-2-4-10>. EDN OGAOKD.
7. Ivanov A.S. Calculation of contact strain in the design of machine/ A.S. Ivanov, V.V. Izmailov // Friction and lubrication in machines and mechanisms, 2006, no. 8, pp. 37–42.

8. Suslov A.G., Fedonin O.N., Polsky E.A. Science intensive technology of quality increase in machinery assembly units at life cycle stage // Science intensive technologies in mechanical engineering, 2016, no. 5(59), pp. 34–41. EDN VZJWYX.

9. Polsky E.A., Sorokin S.V. Improving the reliability of mechanical engineering products by improving the precision analysis of dimensional chains. Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no 6 (132),

pp. 38–48. DOI 10.30987/2223-4608-2022-6-38-48. EDN FUGZAP.

10. Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Smolentsev E.V., Kovaleva E.V., Analysis of the micro profile formation of machine element surfaces at machining stages and running-in conditions of boundary friction // Transport engineering, 2023, no. 9 (21). pp. 24–36. DOI 10.30987/2782-5957-2023-9-24-36. EDN DWSBDH.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.03.2024; одобрена после рецензирования 02.04.2024; принята к публикации 05.04.2024.

The article was submitted 26.03.2024; approved after reviewing 02.04.2024; accepted for publication 05.04.2024.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Вёрстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.05.2024. Выход в свет 30.05.2024.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Брянский государственный технический университет» 241035,
Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+