

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

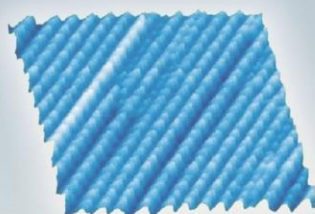
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

12(150)
2023

**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



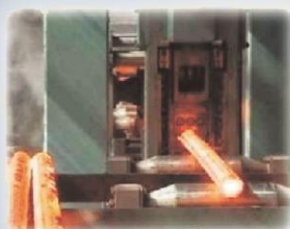
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



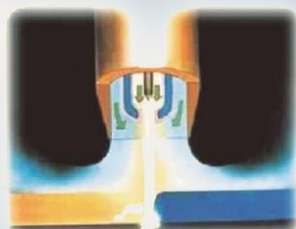
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



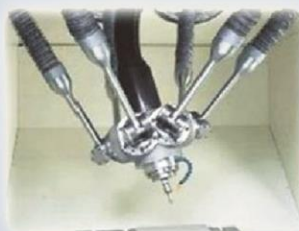
**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ**



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 12 (150)

2023

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., доцент 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., доц. 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., проф., 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

Абдульманова Р.Р., Тюсенков А.С., Бугай Д.Е. О преимуществах
применения стали 10X23H18 вместо сплава Никель 201 для
изготовления труб, стойких в растворах гидроксида натрия. 3

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Демин В.А. Интенсификация горячей листовой штамповки днищ 9

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

Нигметзянов Р.И., Приходько В.М., Сундуков С.К., Клименко В.А.,
Кольдюшов В.К. Применение ультразвука в процессе аддитивного
производства пластиковых деталей 15

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Унянин А.Н., Финагеев П.Р. Исследование эффективности методики
коррекции режима процесса механической обработки с изменяющимися
во времени параметрами в условиях неопределенности
технологической информации. 23

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Бочкарев П.Ю., Решетникова Е.П. Повышение качества технологической
подготовки механообрабатывающих производств на основе расширенного
анализа конструктивных характеристик деталей 30

Нагоркин М.Н., Федоров В.Н., Суслов А.Г., Тотай А.В. Технологическое
управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей
деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной
обработкой 37

Указатель статей за 2023 г. 46

**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

№ 12 (150)

2023

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., assoc. 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., prof. 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

Abdulmanova R.R., Tyusenkov A.S., Bugai D.E. The advantages of using
10X23H18 steel instead of Nickel 201 alloy for making pipes resistant to sodium
hydroxide solutions 3

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF METAL PROCESSING BY PRESSURE

Demin V.A. Intensification of high-temperature bottom plates forming 9

ADDITIVE TECHNOLOGIES AND LASER PROCESSING

**Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Klimenko V.A.,
Koldyushov V.K.** The use of ultrasound in the process of plastic parts additive
manufacturing 15

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Unyanin A.N., Finageev P.R. Study of the technique performance for the
correction of the mode of the machining process with time-varying parameters
in the conditions of technological information uncertainty 23

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF OPERATIONAL PROPERTIES OF MACHINE PARTS AND THEIR CONNECTIONS

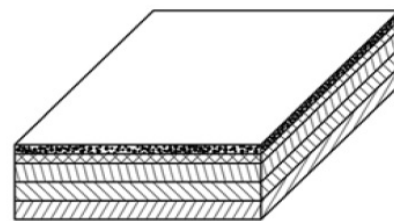
Bochkarev P. Yu., Reshetnikova E.P. Work preparation upgrading for machining
industries based on an expanded analysis of parts design features 30

Nagorkin M.N., Fedorov V.P., Suslov A.G., Totay A.V. Technological control
of surface operational roughness parameters for sliding friction pairs through
combined antifriction surfacing 37

Index of articles 2023 46

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. 2023. №12 (150). С.3-8.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №12 (150). P.3-8.

Научная статья

УДК 661.343

doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-8

О преимуществах применения стали 10Х23Н18 вместо сплава Никель 201 для изготовления труб, стойких в растворах гидроксида натрия

Рушана Ринатовна Абдульманова¹, магистрант

Антон Сергеевич Тюсенков², к.т.н.

Дмитрий Ефимович Бугай³, д.т.н.

^{1, 2, 3} Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

¹ arushanar2001@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-6033-0326>

² anton.tyusenkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8729-4712>

³ debugai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8564-4774>

Аннотация. В окислительных средах никель и его сплавы склонны к пассивации, в связи с чем скорость коррозии оборудования, выполненного из этих материалов, существенно снижается. Никель и его сплавы широко применяют для изготовления оборудования, контактирующего с щелочными растворами. Однако при высоких температурах и больших скоростях потока щелочи существует вероятность контактного износа поверхности металла кристаллами гидроксида натрия вследствие низкой твёрдости никеля. Замена никелевых труб на трубы из более дешёвых коррозионно-стойких сталей позволила бы решить проблему рационального конструирования оборудования и трубопроводов предприятий, связанных с производством гидроксида натрия. В работе приведены результаты сравнительных испытаний коррозионной стойкости стали 10Х23Н18 и сплава Никель 201 в водных растворах гидроксида натрия различной концентрации. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что скорость растворения стали 10Х23Н18 значительно меньше скорости растворения сплава Никель 201. Нужно отметить, что с увеличением концентрации растворов скорость коррозии у стали постепенно снижается, что нельзя сказать о сплаве на основе никеля. Также по результатам измерения твёрдости можно выделить сталь 10Х23Н18, она имеет высокую стойкость к абразивному износу. По шкале коррозионной стойкости оба материала относятся к совершенно стойким. Так как сталь 10Х23Н18 имеет более низкую стоимость по сравнению со сплавом Никель 201, её можно рекомендовать в качестве замены для изготовления оборудования, работающего в растворах гидроксида натрия при комнатных температурах.

Ключевые слова: коррозия в щелочных растворах, гидроксид натрия, коррозионное растрескивание, коррозионно-стойкие стали, гравиметрический анализ, твёрдость

Для цитирования: Абдульманова Р.Р., Тюсенков А.С., Бугай Д.Е. О преимуществах применения стали 10Х23Н18 вместо сплава Никель 201 для изготовления труб, стойких в растворах гидроксида натрия // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-8

The advantages of using 10X23H18 steel instead of Nickel 201 alloy for making pipes resistant to sodium hydroxide solutions

Rushana R. Abdulmanova¹, Master's Degree student

Anton S. Tyusenkov², Ph.D. Eng.

Dmitry E. Bugai³, D. Eng.

Abstract. In oxidizing environments, nickel and its alloys are prone to immunization and therefore the corrosion rate of equipment made of these materials is significantly reduced. Nickel and its alloys are widely used for the manufacture of equipment in contact with alkaline solutions. However, at high temperatures and high alkali flow rates, there is a possibility of contact wear of the metal surface of sodium hydroxide crystals due to the low hardness of nickel. Replacing nickel pipes with ones made of cheaper corrosion-resistant steels would solve the problem of rational design of equipment and pipelines of enterprises associated with the production of sodium hydroxide. The paper presents the results of comparative tests of corrosion resistance of 10X23H18 steel and Nickel 201 alloy in aqueous alkali caustic soda solutions of various concentrations. On a study basis, it can be concluded that the dissolution rate of 10X23H18 steel is significantly less than the dissolution rate of Nickel 201 alloy. It should be noted that with an increase in the concentration of solutions, the corrosion rate of steel gradually decreases, which is not the case for nickel-based alloy. Besides, judging from the results of hardness measurement, 10X23H18 steel can be distinguished due to its high resistance to abrasive wear. According to the scale of corrosion resistance, both materials are absolutely resistant. Since 10X23H18 steel has a lower cost compared to Nickel 201 alloy, it can be recommended substitutionally for the manufacture of the equipment operating in sodium hydroxide solutions at ambient conditions.

Keywords: corrosion in alkaline solutions, sodium hydroxide (caustic soda), corrosion cracking, corrosion-resistant steels, gravimetric analysis, hardness

For citation: Abdulmanova R.R., Tyusenkov A.S., Bugai D.E. The advantages of using 10X23H18 steel instead of Nickel 201 alloy for making pipes resistant to sodium hydroxide solutions / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P. 3–8. doi: 10.30987/2223-4608-2023-3-8

Введение

Сплав Никель 201 имеет высокую степень чистоты благодаря минимальному содержанию примесей (таких как сера и кислород). Его особенностью является повышенное содержание никеля (99,0 %) и пониженное содержание углерода (менее 0,02 %), обеспечивающее высокую стойкость сплава в окислительных средах. Механические свойства данного сплава не подвержены негативному влиянию экстремальных температур. Сплав Никель 201 стоек в щелочных растворах, галогенах, минеральных кислотах.

Следует отметить, что данный сплав обладает высокой стойкостью в каустических растворах, включая солевые расплавы. При этом необходимо учитывать минимальное содержание хлора, поскольку его присутствие может привести к интенсивной коррозии. Однако в окислительных солевых растворах сплав нестойк.

При повышенных температурах и действии растягивающих напряжений в концентрированных растворах щелочей наблюдается коррозионное растрескивание сплава Никель 201 из-за щелочной хрупкости [1 – 3].

Кроме того, при коррозионной эрозии происходит механическое воздействие быстродвижущихся частиц (песок, газовые пузырьки

и др.) на поверхность металла [4 – 7]. Интенсивность эрозионного разрушения зависит от свойств металла и пленок на его поверхности, коррозионной среды, действующих нагрузок и ряда других факторов.

Непрерывное удаление оксидных пленок с поверхности материала при движении коррозионной среды может значительно ускорить коррозионный процесс [8 – 12].

На предприятии АО «Башкирская содовая компания» в качестве материала трубопроводов используется дорогостоящий сплав Никель 201. Несмотря на высокую коррозионную стойкость, он имеет склонность к абразивному износу вследствие низкой твердости. В связи с этим целью данного исследования являлась обоснованная замена сплава Никель 201 более дешевым материалом, который в условиях производства каустической соды проявлял бы высокую коррозионную стойкость и износостойкость.

Исследования проводили с помощью граvimетрического анализа (ГОСТ 9.908-85), который основывается на определении скорости коррозии металлических образцов по потере массы за время пребывания в коррозионной среде заданного состава.

В качестве рабочей среды использовали растворы гидроксида натрия различной концентрации: 50, 60, 70 и 80 %. Твердость

материалов по Роквеллу определяли на ультразвуковом твердомере марки МЕТ-УДА.

После подготовки образцов из сплава Никель 201 и стали 10Х23Н18 в соответствии с ГОСТ 9.908-85 их помещали в колбы с подготовленными растворами NaOH различных концентраций. Продолжительность испытаний

составляла два месяца. Далее образцы извлекали из колб и промывали водой, выдерживали в сушильном шкафу в течение получаса при температуре $60 \pm 2^\circ\text{C}$ и снова взвешивались на аналитических весах.

Результаты испытаний образцов из сплава Никель 201 представлены в табл. 1.

1. Результаты испытаний образцов из сплава Никель 201

1. Test results of Nickel 201 alloy samples

Среда NaOH	$S, \text{м}^2$	$m_1, \text{г}$	$m_2, \text{г}$	$K_m \cdot 10^{-3}, \text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$	$\Pi \cdot 10^{-3}, \text{мм/год}$
50 %	0,00278	19,7323	19,7310	0,287	0,282
	0,00281	17,0158	17,0153	0,109	0,107
	0,00281	19,6415	19,6408	0,153	0,151
60 %	0,00281	17,0635	17,0623	0,263	0,258
	0,00280	17,1858	17,1848	0,220	0,216
	0,00280	17,2592	17,2581	0,241	0,237
70 %	0,00284	17,5169	17,5161	0,173	0,170
	0,00280	19,5029	19,5017	0,263	0,259
	0,00279	19,8764	19,8751	0,286	0,281
80 %	0,00280	16,7659	16,7650	0,197	0,194
	0,00280	20,0090	20,0081	0,197	0,194
	0,00282	20,0647	20,0641	0,131	0,129

Примечания: m_1 – масса образца до испытания, г; m_2 – масса образца после испытания, г; S – площадь поверхности образца, м^2 ; K_m – массовый показатель коррозии, $\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}$; Π – глубинный показатель коррозии, мм/год

График зависимости глубинного показателя скорости коррозии от концентрации NaOH для сплава Никель 201 представлен на рис. 1. Из графика следует, что данная зависимость имеет нелинейный характер с явно выраженным экстремумом при концентрации едкого натра около 65 %. При дальнейшем росте

концентрации гидроксида натрия скорость коррозии сплава начинает снижаться, что связано с образованием защитной пассивной плёнки на поверхности металла.

Результаты испытаний образцов из стали 10Х23Н18 в растворах NaOH различных концентраций представлены в табл. 2.

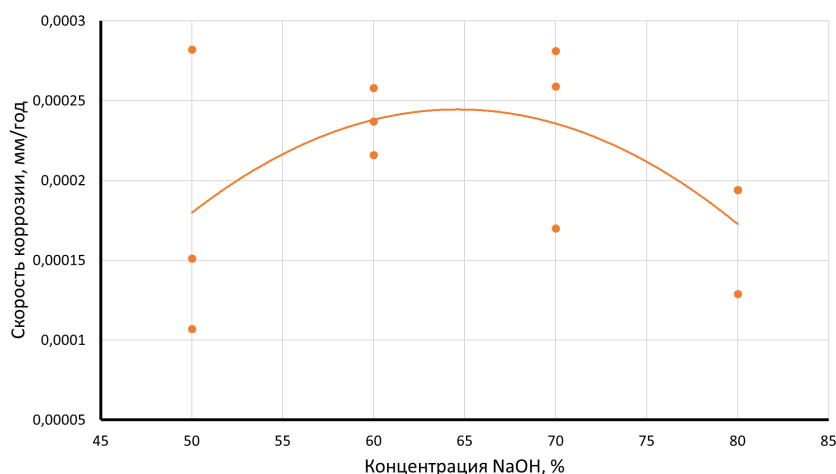


Рис. 1. Зависимость скорости коррозии сплава Никель 201 от концентрации NaOH

Fig. 1. Dependence of Nickel 201 alloy corrosion rate on NaOH concentration

2. Результаты испытаний образцов из стали 10X23H18

2. Test results of 10X23H18 steel samples

Среда NaOH	$S, \text{ м}^2$	$m_1, \text{ г}$	$m_2, \text{ г}$	$K_m \cdot 10^{-3}, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$	$\Pi \cdot 10^{-3}, \text{ мм/год}$
50 %	0,00257	31,3251	31,3249	0,0477	0,0531
	0,00257	31,1550	31,1540	0,2390	0,2660
	0,00258	31,1599	31,1593	0,1430	0,1590
60 %	0,00257	31,0080	31,0076	0,0956	0,1060
	0,00257	31,4352	31,4347	0,1190	0,1330
	0,00257	31,3475	31,3468	0,1670	0,1860
70 %	0,00256	31,2735	31,2730	0,1200	0,1330
	0,00257	31,7144	31,7138	0,1430	0,1600
	0,00256	31,3300	31,3296	0,0958	0,1070
80 %	0,00256	31,1198	31,1196	0,0479	0,0533
	0,00255	30,7524	31,7522	0,0482	0,0536
	0,00254	30,8532	31,8528	0,0966	0,1080

График зависимости глубинного показателя скорости коррозии от концентрации гидроксида натрия для стали 10X23H18 представлен на рис. 2. Из рисунка следует, что данная зависимость не имеет экстремума: с ростом концентрации едкого натра скорость коррозии стали 10X23H18 монотонно нелинейно уменьшается, что также связано с образованием защитных пассивных пленок.

Из совместного анализа зависимостей на рис. 1 и рис. 2 можно заключить, что скорости коррозии образцов из стали 10X23H18 значительно ниже, чем у образцов из сплава Никель 201 во всем интервале концентраций раствора NaOH. Кроме того, пассивация стали начинается сразу и продолжается постоянно до достижения минимальной скорости коррозии при 80 % растворе NaOH.

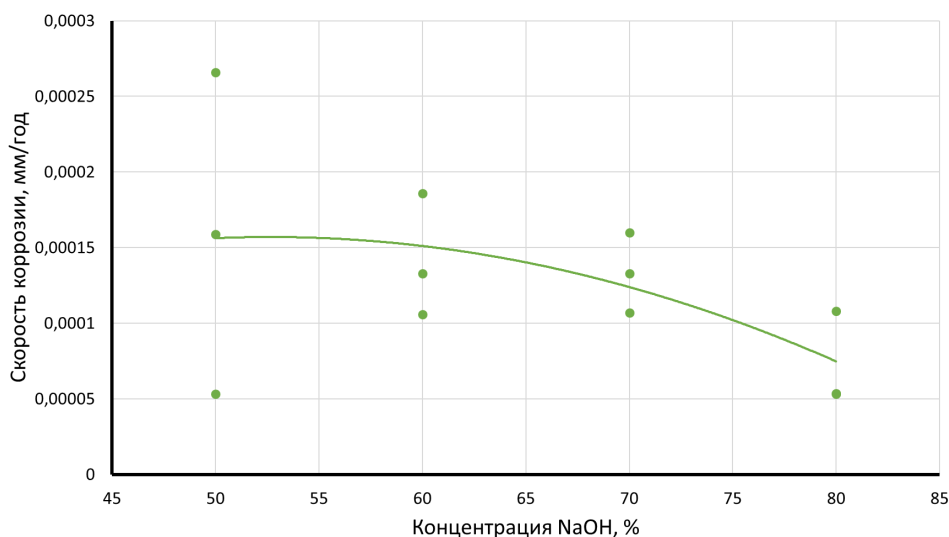


Рис. 2. Зависимость скорости коррозии образцов из стали 10X23H18 от концентрации NaOH

Fig. 2. Dependence of the corrosion rate of 10X23H18 steel samples on NaOH concentration

Гравиметрический анализ показал, что оба исследованных материала имеют достаточно высокую коррозионную стойкость в средах гидроксида натрия различной концентрации,

однако наиболее стойкой при всех концентрациях NaOH оказалась сталь 10X23H18.

Результаты измерения твердости образцов представлены в табл. 3

3. Результаты измерения твердости образцов по Роквеллу, HRC

3. Rockwell hardness measurement results, HRC

Материал	Концентрация раствора, %			
10X23H18	50	60	70	80
Среднее значение твёрдости	25,2	24,5	25,9	26,5
Материал	Концентрация раствора, %			
Никель 201	50	60	70	80
Среднее значение твёрдости	7,8	7,3	5,1	5,2

Известно, что более твердые материалы лучше сопротивляются пластической деформации и износу при абразивном воздействии. По результатам измерения твердости образцов сталь 10X23H18 обладает более высокой износостойкостью по сравнению со сплавом Никель 201.

Выводы

Установлено, что скорость коррозии сплава Никель 201 с увеличением концентрации гидроксида натрия до 60...70 % возрастает, а при более высоких концентрациях снижается вследствие образования на поверхности металла защитной пленки. Скорость растворения стали 10X23H18 с увеличением концентрации гидроксида натрия монотонно снижается. Показано также, что сталь 10X23H18 имеет и более высокую стойкость к абразивному износу.

Оба материала относятся к совершенно стойким в рассматриваемых растворах (один балл по шкале коррозионной стойкости). С учетом того, что сталь 10X23H18 имеет значительно более низкую стоимость по сравнению со сплавом Никель 201, ее можно рекомендовать в качестве замены сплава Никель 201 для изготовления трубопроводов и технологического оборудования, работающего в растворах гидроксида натрия при комнатных температурах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кравцов В.В., Тюсенков А.С., Ризванов Р.Г., Летов А.Ф., Дворецков Р.М. Исследование причин отказов трубопроводов из никелевого сплава при воздействии высоких температур // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 3. С. 110–120.

2. Бугай Д.Е., Латыпов О.Р., Черепашкин С.Е. Коррозионно-стойкие материалы: учебник. Уфа: Изд-во «Нефтегазовое дело», 2012. 197 с.

3. Ермаков А.Е., Филипов Д.А. Анализ причин отказов промышленных трубопроводов // Научный электронный журнал «Меридиан». 2020. № 5 (39). С. 1–4.

4. Ивановский В.Н. Теоретические основы процесса коррозии нефтепромышленного оборудования // Инженерная практика. 2010. № 6. С. 4–14.

5. Копытова Н.П. Защита от коррозии промышленных трубопроводов // Проблемы современной науки и образования. 2017. № 8 (90). С. 19–22.

6. Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Савичева Ю.Н., Попова С.В. Поверхность и поверхностные явления. Уфа: Нефтегазовое дело, 2008. 144 с.

7. Мальцева Г.Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии: Учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 211 с.

8. Роствинская А.С., Роствинская В.С. Коррозия – ущерб экономике и способы борьбы с ней // Трибуна ученого. 2020. № 2. С. 57–64.

9. Рубцов А.В., Чиркова А.Г. Анализ механических свойств сварных соединений с различным уровнем накопления повреждений // В книге: 54-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. 2003. С. 243.

10. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии / Под ред. И.В. Семеновой. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 336 с.

11. Шварц Г.Л., Кристаль М.М. Коррозия химической аппаратуры. Коррозионное растрескивание и методы его предотвращения. М.: Машгиз, 1958. 204 с.

12. Эванс Ю.Р. Коррозия, пассивность и защита металлов: Пер. с англ. / Под ред. Г.В. Акимова. Л.: Химия, 1941. 885 с.

REFERENCES

1. Kravtsov V.V., Tyusenkov A.S., Rizvanov R.G., Letov A.F., Dvoretzky R.M. Research into the causes of nickel alloy pipelines failure under influence of high temperatures stress// Oil and Gas Engineering, 2021, vol. 19, No. 3, pp. 110–120.

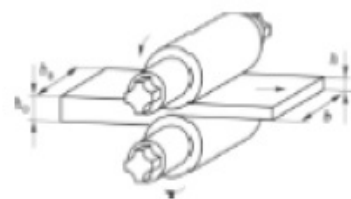
- | | |
|--|--|
| <p>2. Bugai D.E., Latypov O.R., Cherepashkin S.E. Corrosion-resistant materials: textbook. Ufa: Publishing house «Oil and Gas Engineering», 2012, 197 p.</p> <p>3. Ermakov A.E., Filipov D.A. Analysis of causes of failures of field pipelines // Scientific electronic journal «Meridian», 2020, No. 5 (39), pp. 1–4.</p> <p>4. Ivanovskiy V.N. Theoretical foundations of the corrosion process of oilfield equipment // Engineering practice, 2010, No. 6, pp. 4–14.</p> <p>5. Kopytova N.P. Corrosion protection of field pipelines // Problems of modern science and education, 2017, No. 8 (90), pp. 19–22.</p> <p>6. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Savicheva Yu.N., Popova S.V. Surface and surface phenomena. Ufa: Oil and Gas Engineering, 2008, 144 p.</p> <p>7. Maltseva G.N. Corrosion and protection of equipment from corrosion: Textbook. manual. Penza: Publishing House of the Penza State University, 2000, 211 p.</p> | <p>8. Rostvinskaya A.S., Rostvinskaya V.S. Corrosion is a damage to the economy and ways to prevent it // Tribune of the scientist, 2020, No. 2, pp. 57–64.</p> <p>9. Rubtsov A.V., Chirkova A.G. Analysis of mechanical properties of welded joints with different levels of accumulated damage. Collection of scientific articles. // In the book: proceedings of the 54th Scientific and Technical Conference of students, postgraduates and young scientists, 2003, p. 243.</p> <p>10. Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. Corrosion and corrosion protection / Edited by I.V. Semenova. Moscow: FIZMATLIT, 2002, 336 p.</p> <p>11. Schwartz G.L., Kristal M.M. Corrosion of chemical equipment. Corrosion cracking and methods of its prevention. Moscow: Mashgiz, 1958, 204 p.</p> <p>12. Evans Yu.R. Metallic Corrosion, Passivity and Protection: translated from English / Edited by G.V. Akimov. Leningrad: Khimiya, 1941, 885 p.</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 16.10.2023; одобрена после рецензирования 01.11.2023; принята к публикации 03.11.2023.

The article was submitted 16.10.2023; approved after reviewing 01.11.2023; assepted for publication 03.11.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №12 (150). С.9-14.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №12 (150). P.9-14.

Научная статья
УДК 621.7.011
doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-14

Интенсификация горячей листовой штамповки днищ

Виктор Алексеевич Демин, д.т.н.
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия
va_demin@bk, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Рассмотрены вопросы производства горячей листовой штамповкой эллиптических отбортованных стальных днищ, применяемых для сосудов и аппаратов с внутренним диаметром от 300 до 1800 мм из углеродистых, легированных и двух-слойных сталей. Приведены данные, что до настоящего времени авторы исследуют процесс штамповки без изменения температурных полей в заготовке. Приведены примеры работ, которые позволяют уменьшить разнотолщинность в днище от нормативных 15 % относительных деформаций по толщине до 12 %. Показано, что использование переменного температурного поля позволит увеличить коэффициент вытяжки в несколько раз и получить сосуды из двух корпусных деталей. Отмечено, что в технической литературе не рассмотрен вопрос влияния изменения кривой упрочнения при нагреве на устойчивость горячей листовой штамповки. Изучена возможность применения программы QForm для анализа напряженно-деформированного состояния при горячей листовой штамповке. Проведено моделирование нагрева заготовки в газовой печи. В результате расчета получили поле температур и искажение формы заготовки. Сравнение с экспериментом выявило хорошую сходимость результатов по температурам и качественное совпадение искажения формы заготовки. Моделирование в QForm распределения относительных деформаций по толщине по образующей днища, также показало хорошую сходимость с экспериментальной штамповкой. Отмечено, что QForm хорошо моделирует расположения мест максимальных относительных деформаций, что совпадает с результатами экспериментальной штамповки и теоретическими решениями для вытяжки деталей с сферическим дном. По результатам работы даны рекомендации по получению днищ по первой группе точности, когда максимальные относительные деформации по толщине не должны превышать 4,0 %.

Ключевые слова: заготовка, горячая листовая штамповка, днища

Для цитирования: Демин В.А. Интенсификация горячей листовой штамповки днищ // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 9–14. 10.30987/2223-4608-2023-9-14

Intensification of high-temperature bottom plates forming

Viktor A. Demin, D. Eng.
Moscow State Technical University named after N.E. Bauman,
Moscow, Russia
va_demin@bk.ru

Abstract. The issues of high-temperature forming for the production of elliptical steel beaded bottoms, used in vessels and apparatuses with an internal diameter from 300 to 1800 mm, made of carbon, alloy and ply steels, are viewed. There is information that the authors have been studying this forming process of a workblank with no temperature pattern change. There is also data on

examples of tests that allow reducing the thickness difference in the bottom plate from the standard 15 % of relative deformations to 12%. It is shown that the use of a variable temperature pattern will make it possible to increase the extraction coefficient by several times and obtain vessels consisting of two body parts. It is noted that the issue of the influence of changes in the hardening curve when heated on the stability of hot-temperature forming has not been viewed in technical publications yet. The possibility of using the QForm program for the analysis of the stress-strain state for high-temperature forming has been studied. The simulation of the heating of the billet in a gas furnace is carried out. As a result of the calculation, a temperature pattern and a distortion of the shape of the workblank were obtained. Comparison with the experiment revealed good convergence of the results in terms of temperatures and qualitative coincidence of the workblank shape. It is noted that QForm simulates the locations of the places of maximum relative deformations quite well, that is coincident with the results of experimental die forming and theoretical solutions for draw-forming of parts with a spherical bottom. Based on the results of the work, recommendations are given for obtaining bottom plates according to the first class of accuracy, when the maximum relative deformations in thickness should not exceed 4,0 %.

Keywords: workblank, high-temperature forming, bottom plates

For citation: Demin V.A. Intensification of high-temperature bottom plates forming / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P. 9–14. doi: 10.30987/2223-4608-2023-9-14

В химическом машиностроении предъявляются повышенные требования к надежности используемых деталей и узлов, что связано, в первую очередь, с хранением и использованием высокотоксичных веществ. Требования к деталям, естественно, переносятся на заготовки, получаемые обработкой металла давлением.

Днища изготавливают по техническому регламенту ТР 84.402-34-2015, который распространяется на днища эллиптические отбортованные стальные по ГОСТ 6533 с толщиной стенки от 4,0 до 32 мм для сосудов и аппаратов с внутренним диаметром от 300 до 1800 мм из углеродистых, легированных и двух-слойных сталей. В условиях серийного производства эллиптические днища изготавливаются, как правило, горячей листовой штамповкой на гидравлических прессах. В силу особенностей этого вида обработки давлением, днище получается с переменной толщиной стенки, а т. к. расчет на прочность ведётся по минимальной толщине изделия, то толщину заготовки увеличивают, как правило, на 15 %, где 15 % – относительная деформация по толщине. Это, естественно, приводит к существенному перерасходу металла и увеличению веса изделия.

В то же время сосуды, работающие под давлением, разделяются на группы с первой по пятую, где первая группа – это сосуды, работающие под большим давлением и соответственно эллиптическое днище должно иметь отклонения размеров по сечению толщины согласно ГОСТ 6533-78 до 4,0 %.

Исследованию горячей листовой штамповки днищ посвящено относительно небольшое количество работ. В первоначальных работах [1], в основном приводились результаты

практической штамповки днищ и определение максимальной силы штамповки.

С появлением пакетов прикладных программ для расчета процессов горячей штамповки проведены исследования [2] изменения температурных полей в процессе переноса листовой заготовки от печи до пресса, а также в работах [3, 4] проведен анализ напряженно-деформированного состояния при горячей листовой штамповки днищ.

В работе [5] была поставлена задача, исследовать горячую толстолистовую штамповку материала, имеющего очень небольшой температурный интервал штамповки, всего 50 °С. Поэтому на первом этапе расчета проанализирован нагрев заготовки в печи. Рассчитано время нагрева, при котором температура равномерно распределяется по толщине. Затем рассмотрели изменение температуры при переносе заготовки от печи до пресса и изменение температуры при штамповке.

В работе [6] проведено исследование методов нагрева заготовок для горячей листовой штамповки, а в работе [7] проведена оценка предельной степени вытяжки листовых изделий со сферическим дном в условиях горячей деформации.

Относительно недавно в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б.Н. Ельцина был выполнен цикл работ [8 – 11] по горячей листовой штамповке днищ. Авторы поставили перед собой цель снизить металлоемкость эллиптических горячештампованных днищ за счет уменьшения технологического напуска. Достаточно подробно рассмотрены причины, по которым при штамповке происходит утонение исходной

заготовки и даны пути уменьшения относительных деформаций по толщине. Получено типовое распределение деформаций по образующей, представленное на рис. 1 (значения изменения толщины указаны в относительных деформациях по толщине).

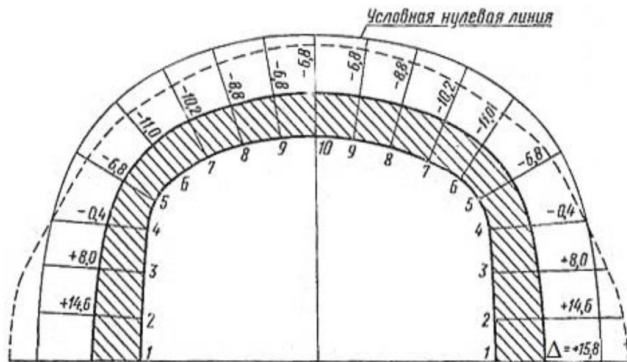


Рис. 1. Характерное относительное изменение толщины стенки днищ при горячей штамповке

Fig. 1. Characteristic relative change in the wall thickness of the bottom plate during high-temperature forming

Как видно на рис. 1 максимальное утонение происходит в вершине эллипса и зоне действия изгибающих моментов. Как и положено при вытяжке, во фланце происходит увеличение толщины заготовки под действие тангенциальных сжимающих напряжений.

Поэтому нам необходимо в эллиптической части днища или уменьшить растягивающие напряжения или увеличить в этом месте напряжение текучести σ_s .

В результате моделирования в DEFORM-3D типового технологического процесса получено, что для аустенитных сталей технологическую прибавку для компенсации утонения стенки при штамповке допускается снизить с 15 % до 7,0 %, для днищ из углеродистых и низколегированных сталей – до 10 %. В тоже время не ясно, учитывалось в работе изменение начальной толщины заготовки. Например, для листа из стали 10, толщиной 10 мм допускается уменьшение толщины на 0,8 мм (8,0 %).

Таким образом, проблема существующей технологии состоит в том, что нельзя добиться постоянного соответствия требованиям по ГОСТ 6533-78 первой группы, чтобы относительное уменьшение толщины было меньше 4,0 %.

Рассмотрим интенсификацию процесса штамповки днищ за счет нагрева фланца заготовки.

В случае, если учитываем влияния на процесс вытяжки только формоизменения, получаем предельный коэффициент вытяжки $K = 2,7$, где $K = R/r$; R – радиус заготовки; r – радиус детали.

Предположим, что мы нагрели фланец заготовки по экспоненте и уменьшили предел текучести σ_{s0} в 2,0 раза, тогда:

$$\sigma_{pmax} = \frac{1}{2} \sigma_{s0} \ln \frac{R}{r},$$

где σ_{pmax} – максимальное напряжение в опасном сечении; σ_{s0} – значение предела текучести при комнатной температуре.

Элементарные расчеты показывают, что

$$\sigma_{pmax} = \sigma_{s0};$$

$$2 = \ln \frac{R}{r};$$

$$\frac{R}{r} = K = e^2 = 7,4.$$

Если уменьшим σ_{s0} в 4,0 раза, тогда получим:

$$\sigma_{pmax} = \frac{1}{4} \sigma_{s0} \ln \frac{R}{r}; 4 = \ln \frac{R}{r}; \frac{R}{r} = K = e^4 = 54.$$

Таким образом, теоретически, появляется возможность увеличить коэффициент вытяжки в 20 раз. На практике, конечно, такие величины K недостижимы, однако мы можем получить изделия с очень высокими бортами или, при меньших значениях K , существенно уменьшить растягивающие напряжения в эллиптической части днища.

Однако при нагревании заготовки должна возникнуть проблема, связанная с тем, что при повышении температуры кривая упрочнения начинает приближаться к идеально пластической. Например, кривая упрочнения для стали 10, построенная для температур 800 °С, 900 °С, 1000 °С и 1100 °С показана на рис. 2. Как известно, очень пластичные материалы, как свинец, пищевой алюминий и другие материалы, не имеющие упрочнения, не поддаются листовой штамповке из-за потери устойчивости при деформировании.

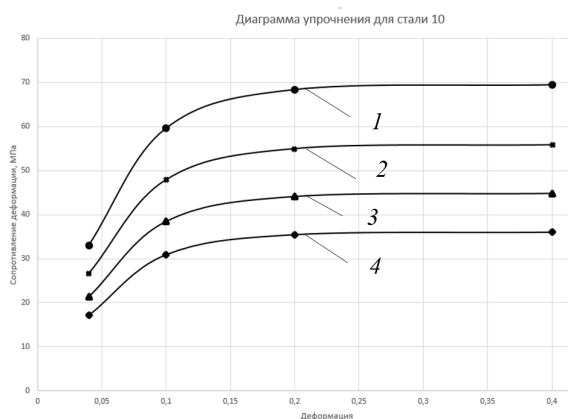


Рис. 2. Кривая упрочнения для Стали 10:
1 – 800 °C; 2 – 900 °C; 3 – 1000 °C; 4 – 1100 °C

Fig. 2. Hardening curve for Steel 10:
1 – 800 °C; 2 – 900 °C; 3 – 1000 °C; 4 – 1100 °C

Для уточнения параметров горячей листовой штамповки днищ было проведено исследование изготовления эллиптического днища на одном из заводов Московской области. Изменения толщины в процессе вытяжки изучали при помощи моделирования в программном обеспечении QForm.

Для определенности была взята деталь, представленная на рис. 3.

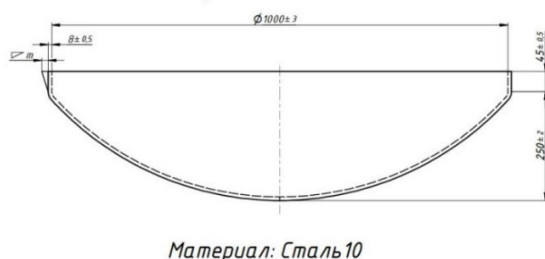


Рис. 3. Эскиз готовой детали после механической обработки

Fig. 3. Sketch of the finished part after machining

Данная деталь используется в добывающей промышленности (как часть сосуда), так же в химической промышленности (сосуды высокого давления).

Расчет заготовки показал, что диаметр заготовки должен быть $D = 1270$ мм. При этом коэффициент вытяжки всего 1,27.

Исходные данные для расчета:

- вид печи: камерная нагревательная печь;
- нагреваемый металл: Сталь 10;
- конечная температура поверхности металла, 1100 °C;
- топливо: природный газ.

Анализ распределения деформаций, показывает, что наиболее опасные зоны с точки зрения разрушения располагаются на борту днища, в местах гофр, которые при прохождении через зазор между пуансоном и матрицей расправились. В зоне перехода от эллиптической к цилиндрической части днища по всему объему преобладают растягивающие напряжения. Так как мы нагреваем всю заготовку в газовой печи, то необходимо учесть, что после нагрева она изгибается вверх и это сильно влияет на процесс штамповки.

Промоделированная заготовка после нагрева в газовой печи представлена на рис. 4:



Рис. 4. Модель заготовки после нагрева в газовой печи до 1100 °C

Fig. 4. Model of the workblank after heating in a gas oven up to 1100 °C

Как видно на рис. 4 моделирование показывает равномерный нагрев заготовки в заданное время и изгиб фланца.

Заготовка после нагрева в газовой печи на производстве представлена на рис. 5.

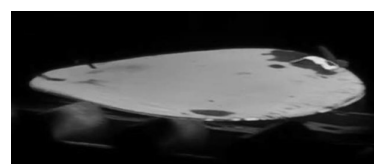


Рис. 5. Заготовки после нагрева в газовой печи до 1100 °C.

Fig. 5. Workblanks after heating in a gas furnace up to 1100 °C.

При нагреве заготовки в печи, края заготовки так же поднимаются, т. е. происходит изгиб заготовки, как при моделировании.

Вследствие изгиба, появляется необходимость прижимом сделать правку заготовки под последующую штамповку.

Распределение деформаций детали в конце моделирования представлено на рис. 6:



Рис. 6. Распределение деформаций детали после моделирования в Qform.

Fig. 6. The distribution of deformations of the part after modeling in Qform.

Моделирование в QForm показывает, что максимальные деформации находятся во фланце и в зоне изгиба по матрице, что подтверждается экспериментом. Поэтому необходимо уменьшить деформацию на участках перехода цилиндрической части к эллиптической.

Для проведения экспериментальной штамповки на производстве на заготовку была нанесена разметка по схеме, показанной на рис. 7.

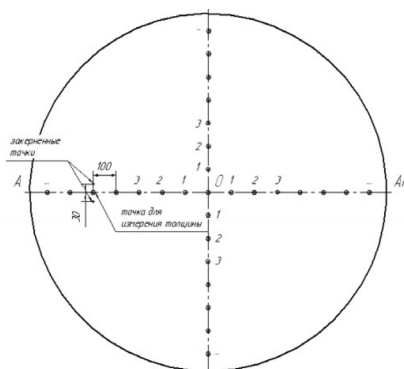


Рис. 7. Схема измерения толщины дна после штамповки

Fig. 7. Thickness measurement pattern bottoms after stamping

Заготовка с нанесенной разметкой показана на рис. 8.



Рис. 8. Заготовка с разметкой точек для измерения толщины дна после штамповки

Fig. 8. Workblank with marking points for measuring thickness of the wall after stamping

После горячей листовой штамповки дна были проведены измерения относительной деформации по толщине. Результаты показаны на рис. 9.

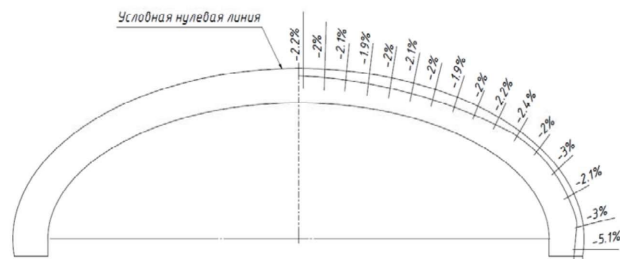


Рис. 9. Распределение относительных деформаций по толщине в готовой детали

Fig. 9. Distribution of thickness relative deformations in the finished part

Сравнение результатов штамповки, представленных на рис. 1 и рис. 9, показывает, что достигнуты лучшие результаты за счет уменьшения коэффициента вытяжки, т. к. его уменьшение позволяет уменьшить растягивающие напряжения. Однако в зоне изгиба, при сходе металла с кромки матрицы, происходит резкое увеличение относительных деформаций по толщине (до 50 %). Такие же результаты получены при моделировании процесса (см. рис. 6).

Полученные результаты позволяют предположить, что охлаждение участков с максимальной деформацией и нагрев в местах, где деформации минимальные, позволит получить более равномерное распределение относительной деформации по толщине.

Выводы

1. Традиционная технология, с равномерным нагревом всей заготовки, как правило, не позволяет получать дна по первой группе.
2. Уменьшение коэффициента вытяжки улучшает равномерное распределение относительной деформации по толщине по образующей детали.
3. Создание градиента температур по поверхности заготовки может:
 - теоретически увеличить устойчивость вытяжки;
 - получить более равномерное распределение относительной деформации по толщине.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Мошнин Е.Н.** Технология штамповки крупногабаритных деталей. М.: Машиностроение, 1973. 240 с.
2. **Каргин Б.С., Липчанский А.А.** Исследование температурных полей в заготовке для детали «днище» при ее переносе от печи к прессу // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 27. С. 52–56.
3. **Липчанский А.А., Каргин Б.С.** Анализ напряжено-деформированного состояния при горячей листовой штамповке днищ // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. 2014. № 1 (15). С. 71–76.
4. **Степанов-Бомбоев М.С., Куликова Т.К., Елаева Н.К.** Моделирование процесса горячей листовой штамповки титановых деталей в среде QFORM // В сборнике: Наука, общество, образование в условиях цифровизации и глобальных изменений. Сборник статей IV Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022. С. 21–26.
5. **Демин В.А.** Горячая листовая штамповка днищ // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2002. № 8. С. 16–19.
6. **Галсанова Э.Ц., Грешилов А.Д., Калинин Я.В., Яковлев А.А.** Исследование методов нагрева заготовок при горячей листовой штамповке // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 8 (255). С. 57–60.
7. **Галкин В.В., Калинин А.Б., Пачурин Г.В., Ермаков Д.Ю.** Предельная степень вытяжки листовых изделий со сферическим дном в условиях горячей деформации // Фундаментальные исследования. 2014. № 5-5. С. 939–944.
8. **Кузнецов А.Ф., Горбунова Ю.Д., Орлов Г.А.** Исследование изменения толщины стенки эллиптических тонкостенных днищ при штамповке // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017. № 3. С. 19–23.
9. **Орлов Г.А., Горбунова Ю.Д., Котов В.В.** Анализ качества горячештампованных днищ. В сборнике: Авиационное машиностроение и транспорт Сибири // Сборник статей X международной научно-технической конференции. 2018. С. 73–77.
10. **Горбунова Ю.Д., Горяев А.И., Кузнецов А.Ф., Орлов Г.А.** Оценка качества горячештампованных эллиптических днищ с использованием комплексных показателей // Заготовительные производства в машиностроении (Кузнечно-прессовое, литейное и другие производства). 2019. Т. 17. № 1. С. 41–47.

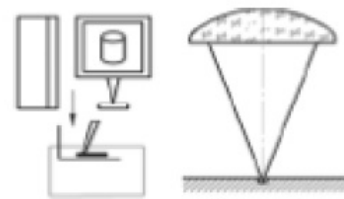
11. **Горбунова Ю.Д., Орлов Г.А.** Моделирование горячей штамповки эллиптических стальных днищ. Черные металлы. 2019. № 10. С. 58–62.

REFERENCES

1. Moshnin E.N. Technology of stamping of large-sized parts. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 240 p.
2. Kargin B.S., Lipchansky A.A. Investigation of temperature limits in a workblank for the «bottom» part during its transfer from the furnace to the press. Bulletin of the Azov State Technical University. Issue: Technical Sciences, 2013, No. 27, pp. 52–56.
3. Lipchansky A.A., Kargin B.S. Analysis of the stress-strain state during hot-temperature forming of bottom plates. Resource-saving technologies of production and pressure treatment of materials in mechanical engineering, 2014, No. 1 (15), pp. 71–76.
4. Stepanov-Boboev M.S., Kulikova T.K., Yelaeva N.K. Modeling of the process of hot-temperature of titanium parts in the QFORM environment. In the shot: Science, society, education in the context of digitalization and global changes. Proceedings of the IV-th International Scientific and Practical Conference. Penza, 2022, pp. 21–26.
5. Demin V.A. Hot sheet stamping of bottoms. Processing of materials by pressure, 2002, No. 8, pp. 16–19.
6. Galsanova E.Ts., Greshilov A.D., Kalinin Ya.V., Yakovlev A.A. Investigation of methods of heating blanks under high-temperature forming. Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2021. No. 8 (255). pp. 57–60.
7. Galkin V.V., Kalinin A.B., Pachurin G.V., Ermakov D.Yu. Limiting degree of dome sheet products with spherical bottom in hot strain. Fundamental research, 2014, 5-5, pp. 939–944.
8. Kuznetsov A.F., Gorbunova Yu.D., Orlov G.A. The study of the wall thickness changing of thin-walled elliptical bottoms during stamping // Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure, 2017, No. 3, pp. 19–23.
9. Orlov G.A., Gorbunova Yu.D., Kotov V.V. Quality analysis of hot-temperature formed bottoms. In the shot: Aircraft engineering and transport of Siberia. Proceedings of the X-th International Scientific and Technical Conference, 2018, pp. 73–77.
10. Gorbunova Yu.D., Goryaev A.I., Kuznetsov A.F., Orlov G.A. Assessment of the quality of hot-stamped elliptical bottoms using complex indicators // Blank production in mechanical engineering (Forging, foundry and other productions). 2019, vol. 17, No. 1, pp. 41–47.
11. Gorbunova Yu.D., Orlov G.A. Simulation of hot stamping of elliptical steel bottoms. Ferrous metals, 2019, No. 10, pp. 58–62.

Статья поступила в редакцию 23.10.2023; одобрена после рецензирования 07.11.2023; принята к публикации 08.11.2023.

The article was submitted 23.10.2023; approved after reviewing 07.11.2023; assepted for publication 08.11.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №12 (150). С.15-22.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №12 (150). P.15-22.

Научная статья
УДК 534-8, 621.9.048.6
doi: 10.30987/2223-4608-2023-15-22

Применение ультразвука в процессе аддитивного производства пластиковых деталей

Равиль Исламович Нигметзянов¹, к.т.н.
Вячеслав Михайлович Приходько², чл.-кор. РАН

Сергей Константинович Сундуков³, к.т.н.

Виктор Александрович Клименко⁴, к.т.н.

Владимир Константинович Кольдюшов⁵, аспирант

^{1, 2, 3, 5} ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ), Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский Государственный Университет,
Томск, Россия

¹ lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² prihodko@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

³ sergey-lefmo@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4393-4471>

⁴ klimenko@siberia.design, <https://orcid.org/0000-0002-4112-9690>

⁵ v.koldyushov@list.ru <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Несмотря на огромные перспективы послойного синтеза изделий, позволяющего производить детали уникальной формы, широкому распространению метода препятствуют сложности, связанные с обеспечением микрогеометрии поверхности изделия, которая в связи с особенностями послойного производства имеет высокую шероховатость, а механические методы обработки зачастую не позволяют производить постобработку сложнопрофильных элементов. В статье рассмотрена проблема обеспечения качества поверхностного слоя пластиковых деталей, полученных аддитивными технологиями. С этой целью предлагается использовать технологии ультразвуковой обработки. Проанализированы существующие методы применения ультразвуковых колебаний при производстве пластиковых деталей: изготовление проволоки для 3D-печати с наполнителями, что приводит к повышению механических свойств изделия, и жидкостная обработка погружённого в растворитель изделия с целью удаления поддерживающих элементов. Проведены исследования по финишной обработке деталей в аэрозоле растворителя, полученным методом ультразвукового распыления. Данный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с обработкой в парах растворителя, полученных при его нагреве, к которым относятся возможность регулирования размера капель, скорости их движения, концентрации аэрозоля за счёт изменения режимов ультразвукового воздействия. В результате экспериментальных исследований установлено, что применение данного способа обработки приводит к повышению качества поверхностей обрабатываемого образца. Снижению высотных параметров шероховатости в направлении, перпендикулярном послойному росту изделия, более чем в десять раз. Механизм изменения микрогеометрии поверхности, следующий: при попадании капель аэрозоля на поверхность, часть материала, образующего выступы, растворяется и в жидком состоянии заполняет впадины; после окончания обработки материал полимеризуется, образуя поверхность с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: ультразвук, колебания, 3D-печать, шероховатость, аэрозоль

Для цитирования: Нигметзянов Р.И., Приходько В.М., Сундуков С.К., Клименко В.А., Кольдюшов В.К. Применение ультразвука в процессе аддитивного производства пластиковых деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 15–22. doi: 10.30987/2223-4608-2023-15-22

The use of ultrasound in the process of plastic parts additive manufacturing

Ravil I. Nigmatzyanov¹, Ph.D. Eng.
Vyacheslav M. Prikhodko², A.M. RAS

Sergey K. Sundukov³, Ph.D. Eng.

Viktor A. Klimenko⁴, Ph.D. Eng.

Vladimir K. Koldyushov⁵, Ph.D. student

^{1, 2, 3, 5} of the Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

⁴ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ lefmo@yandex.ru

² prikhodko@madi.ru

³ sergey-lefmo@yandex.ru

⁴ klimenko@siberia.design

⁵ v.koldyushov@list.ru

Abstract. Despite huge prospects for the layer-by-layer synthesis of products, which makes it possible to produce parts of a unique shape, the widespread use of the method face the problems of making a proper microgeometry of the product surface, which due to the peculiarities of layer-by-layer production is rather rough, and mechanical methods of machine working often do not admit the possibility of figure-shaped parts post processing. The article studies the problem of ensuring the quality of the plastic parts surface layer obtained by additive technologies. For this purpose, it is proposed to use ultrasonic processing technologies. The existing methods of using ultrasonic vibrations in the production of plastic parts are analyzed: the manufacture of wire for 3D printing with additives, which results in an increase in the mechanical properties of the product. Besides, liquid treatment of a solvent-loaded product in order to remove supporting elements. Studies have been carried out on the finishing of parts in a solvent aerosol obtained by ultrasonic spraying. This method has a number of advantages in comparison with the treatment in solvent vapors obtained during its heating, which include the possibility of regulating the size of droplets, their moving speed, aerosol concentration, caused by changing the modes of ultrasonic treatment. As a result of experimental studies, it is found that the use of this treatment method eventuates an increase in the quality of the sample surfaces to be worked, and besides, it reduces the height parameters of roughness in the direction perpendicular to the layered growth of the product by more than a factor of ten. The mechanism of changing the microgeometry of the surface is as follows: when aerosol droplets contact the surface, part of the material forming the protrusions dissolves and fills valleys, while in the liquid state; after finishing the work, the material polymerizes, generating a surface with improved features.

Keywords: ultrasound, vibrations, 3D printing, roughness, aerosol

For citation: Nigmatzyanov R.I., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Klimenko V.A., Koldyushov V.K. The use of ultrasound in the process of plastic parts additive manufacturing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P. 15–22. doi: 10.30987/2223-4608-2023-15-22

Введение

Технологии аддитивного производства имеют значительные перспективы для развития машиностроения. Возможность создавать детали уникальной геометрической формы, снижение материалоемкости производства, и замена, где это необходимо, процессов сборки соединений на послойную печать соединения целиком — являются основными преимуществами аддитивных технологий по сравнению с традиционным производством, основанном на формообразовании путём удаления материала заготовки [1, 2].

Тем не менее, в настоящее время технологии аддитивного производства не имеют

масштабного и массового применения, что связано с рядом недостатков, обусловленных особенностями послойного производства [3]:

- анизотропия свойств изделия в перпендикулярном и параллельном направлении относительно направления печати;

- погрешность при получении каждого слоя приводит к повышению шероховатости образуемой поверхности;

- сложность с дополнительной обработкой таких поверхностей как металлических, так и пластиковых изделий, особенно в случае со сложной геометрией;

- необходимость использования поддержек, которые после 3D-печати требуется удалить;

– низкая скорость производства изделия;

– высокая стоимость расходных материалов и обслуживания оборудования, и как следствие высокая стоимость изделия.

С точки зрения обеспечения эксплуатационных характеристик изделия наиболее важной является проблема достижения требуемой шероховатости сложнопрофильных участков поверхностей (особенно это касается внутренних каналов и отверстий), где механическая обработка зачастую невозможна. Также всегда актуальны вопросы повышения твёрдости и прочности получаемого изделия.

В данной работе рассмотрены вопросы применения ультразвуковых технологий в процессе аддитивного производства пластиковых деталей с целью повышения механических и геометрических свойств.

Аддитивное изготовление пластиковых объектов

Наибольшее распространение для послойного синтеза пластиковых изделий получил метод FDM-печати (Fused Deposition Modeling) [4]. Процесс FDM-печати производится по схеме на рис. 1. Специальный пластик (ABS или PLA) в форме нити 1 с помощью роликов 2 подаётся в экструдер, состоящий из нагревательного элемента 3 и сопла 4. При этом экструдер осуществляет перемещения по координатам, соответствующим 3D-модели изготавливаемой детали 5, поделённой на слои с помощью специальной программы. Температура в экструдере задаётся немного выше температуры плавления используемого пластика, в результате чего он расплавляется на выходе из сопла и полимеризуется практически сразу после нанесения на предыдущие слои.

Особенностью изготовленных деталей является ячеистое заполнение внутренней части, что позволяет сократить время изготовления и расход пластика.

Таким способом можно изготавливать модели, применяемые для визуализации технических решений. В этом случае используется ячеистое заполнение внутренней части детали, снижается расход пластика и уменьшается время печати.

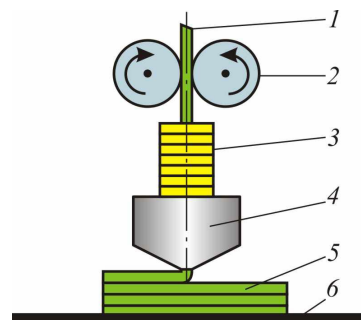


Рис. 1. Схема экструдирования при FDM-печати:

1 – проволока; 2 – ролики; 3 – нагревательный элемент; 4 – сопло экструдера; 5 – изготавливаемая деталь; 6 – подложка

Fig. 1. The extrusion scheme for FDM printing:

1 – wire; 2 – rollers; 3 – heating element; 4 – extruder nozzle; 5 – manufactured part; 6 – substrate

Также изготавливаются детали типа кронштейнов, крышек, фитингов и т. д. различного назначения. В данном случае для обеспечения прочности детали требуется значительно увеличить плотность заполнения её внутренней части, что приводит к увеличению времени изготовления и повышению расхода применяемого пластика.

При этом остаётся вопрос обеспечения требуемой микрогеометрии функциональных поверхностей изделий.

С целью повышения механических свойств полимерных изделий широко применяется добавление различных наполнителей, в качестве которых применяются порошки металлов, графит, шунгит, углеродные нанотрубки и т. д. [5, 6]. При затвердевании состава они являются дополнительными центрами полимеризации, что упорядочивает структуру полимера.

В лаборатории электрофизических методов обработки МАДИ проведены экспериментальные исследования по добавлению в нити ABS-пластика алюминиевой пудры [7]. Нарезанная на небольшие части проволока из ABS-пластика KUMHO ABS 750 засыпалась в ёмкость 200 мл, которая подогревалась до его температуры плавления 190 °С. В расплавленный пластик добавлялось 10 % алюминиевой пудры по массе. В полученную смесь погружался излучатель стержневой магнитострикционной колебательной системы, запитанной от генератора УЗГ 2,0/22. Амплитуда колебаний составляла 30 мкм, время обработки 10 с.

При выбранном высокоамплитудном режиме обработки возникают крупномасштабные акустические течения, которые равномерно распределяют наполнитель по обрабатываемому объёму. Помимо этого, частички алюминиевой пудры являются очагами кавитации, что способствует расщеплению макромолекул и дефрагментации полимерных цепочек [8], что дополнительно снижает вязкость смеси и упрощает обработку. После полимеризации смесь делилась на части, и с помощью шнекового экструдера Filabot Original производилась проволока требуемого диаметра. Печать образцов (кубик) из полученной проволоки на 3D-принтере PICASO 3D Designer печатались кубики 10×10×5 мм. Фотографии поверхности контрольного и исследуемого образцов представлены на рис. 2.

Поверхность образца с изготовленной проволокой имеет меньшую высоту выступов и меньше выраженные границы между слоями, что объясняется уменьшением времени застывания пластика после выхода из сопла экструдера за счёт содержания алюминия и созданием центров полимеризации вокруг частиц алюминиевой пудры.

Увеличению твёрдости составило порядка 50 %, что позволит изготавливать изделия с повышенной прочностью при меньшей заполняемости внутренней части детали.

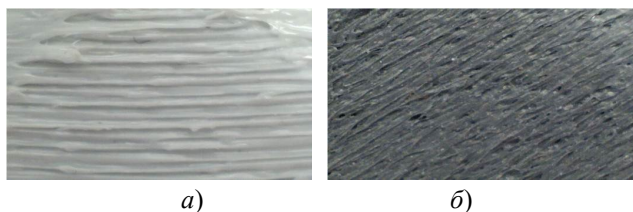


Рис. 2. Фотографии (×20) образцов:

a – 100 % ABS-пластик; *б* – 90 % ABS-пластик, 10 % алюминиевая пудра

Fig. 2. Photos (×20) of samples:

a – 100 % ABS plastic; *b* – 90 % ABS plastic, 10 % aluminum powder

В работе [9] проведены исследования по ультразвуковой жидкостной обработке пластиковых образцов в среде растворителя с целью удаления поддержек, расположенных в труднодоступных местах. Фотографии образцов, имитирующих поддержки, растворяемые в различных условиях, представлены на рис. 3.

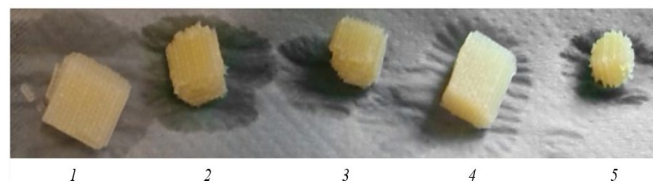


Рис. 3. Опытные образцы материала после 1,0 ч процессов растворения:

1 – с 10 мл деминерализованной воды; 2 – 0,6 г NaOH, растворенного в 10 мл деминерализованной воды; 3 – 0,6 г NaOH, растворенного в 10 мл деминерализованной воды выдерживали при 30 °C; 4 – с 10 мл деминерализованной воды, помещенной в ультразвуковую ванну (при 30 °C) на 2×15 мин с промежутком 45 мин; 5 – 0,6 г NaOH, растворенного в 10 мл деминерализованной воды, с помещением в ультразвуковую ванну (при 30 °C) на 2×15 мин с промежутком 45 мин

Fig. 3. Prototypes of the material after 1,0 h of dissolution processes:

1 – with 10 ml of demineralized water; 2 – 0,6 g of NaOH dissolved in 10 ml of demineralized water; 3 – 0,6 g of NaOH dissolved in 10 ml of demineralized water was kept at 30 °C; 4 – with 10 ml of demineralized water placed in an ultrasonic bath (at 30 °C) for 2×15 minutes with an interval of 45 minutes; 5 – 0,6 g of NaOH dissolved in 10 ml of demineralized water, placed in an ultrasonic bath (at 30 °C) for 2×15 minutes with an interval of 45 minutes

Лучший результат показала обработка ультразвуком в растворе гидроксида натрия NaOH (образец 5). Обработка при резонансной частоте 45 кГц привела к потере массы с 1,0 до 0,32 г, в то время как без ультразвука масса образца составила 0,47 г. Сделан вывод, что в результате интенсификация химической реакции, а также возможности направленного действия ультразвука, предлагаемый способ эффективен для удаления поддержек при 3D-печати.

Также метод объёмной ультразвуковой обработки в жидкой среде известен для обеспечения качества поверхностей металлических изделий [10]. Направленное ударное воздействие абразивных частиц в условиях кавитации и акустических течений позволяют разрушать выступы микронеровностей и удалять застывшие мелкие брызги, образованные в процессе плавления порошка металла, с обрабатываемой поверхности.

Для снижения шероховатости пластиковых деталей данный метод не применяется, т. к. приведёт к значительной потере материала с поверхностей изделия, контактирующих с растворителем. Для повышения геометрических

свойств применяется метод «глянцевания», заключающийся в выдержке изделия в парах растворителя. В результате контакта с каплями аэрозоля происходит частичное растворение пластика на поверхности изделия. Недостатками данного метода являются необходимость нагрева растворителя, что увеличивает его химическую активность и не даёт возможность длительной обработки, что снижает эффективность при обработке сложнопрофильных внутренних элементов поверхности.

В данном случае предлагается использовать аэрозоль, полученный ультразвуковым распылением.

Преимущества ультразвукового распыления

Механизм распыления слоя жидкости описывается кавитационно-волновой теорией [11]. Согласно этой теории, распыление осуществляется путем отрыва капелек жидкости с гребней стоячих волн, параметрически возбуждаемых на поверхности раздела сред жидкость-воздух вследствие возмущения поверхности жидкости при пульсации и захлопывании кавитационных пузырьков (рис. 4).

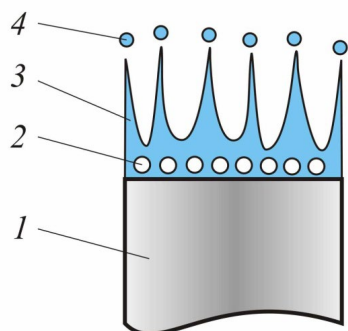


Рис. 4. Механизм образования капель аэрозоля:

1 – излучатель; 2 – кавитационные пузырьки; 3 – капиллярные волны; 4 – капли аэрозоля

Fig. 4. Aerosol droplet formation mechanism:

1 – emitter; 2 – cavitation bubbles; 3 – ripple waves; 4 – aerosol droplets

Таким образом, основным эффектом, определяющим процесс распыления жидкости, является кавитация. В результате зависимости количества кавитационных пузырьков и их активности от амплитуды и частоты колебаний обеспечивается возможность за счёт изменения

параметров режима колебаний изменять дисперсность капель аэрозоля, скорость их движения и концентрацию аэрозоля. При этом для распыления не требуется повышенной температуры.

Методика проведения экспериментальных исследований

На 3D-принтере PICASO 3D Designer из ABS-пластика KUMHO ABS 750 на одинаковых режимах печатались два образца в виде кубиков $20 \times 20 \times 20$ мм с двумя пересекающимися отверстиями диаметром 5,0 мм. Один образец выбирался как контрольный, второй обрабатывался в аэрозоле, полученном методом ультразвукового распыления ацетона по схеме, представленной на рис. 5.

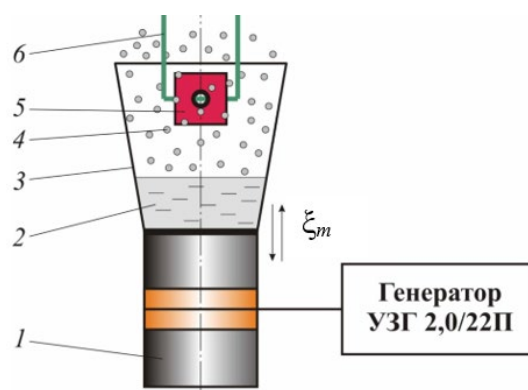


Рис. 5. Схема обработки:

1 – пьезокерамический преобразователь; 2 – ацетон; 3 – стеклянный излучатель; 4 – капли аэрозоля; 5 – образец; 6 – подвес

Fig. 5. Treatment pattern:

1 – piezoceramic converter; 2 – acetone; 3 – glass emitter; 4 – aerosol droplets; 5 – sample; 6 – suspension

Ультразвуковая колебательная система представляла собой полуволновой пьезокерамический преобразователь 1 и приклеенный к нему стеклянный излучатель 3 конусообразной формы и расширяющийся кверху. Питание колебательной системы осуществлялось от генератора УЗГ 2,0/22П, имеющему функцию автоматической подстройки частоты, что необходимо для поддержания резонансного режима колебаний при изменении уровня распыляемой жидкости (в данном случае ацетона 2). Резонансная частота составляла 22 300 Гц, амплитуда колебаний 5,0 мкм. Образец 5 с помощью подвеса 6 размещался на уровне ниже верхнего края излучателя и выше уровня ацетона. При

включении генератора с поверхности ацетона отрывались капли, образуя аэрозоль 4, потребляемая генератором мощность при этом составляла порядка 50 Вт. Обработка производилась в течение 10 с.

Далее боковая поверхность образца, которая является образующей для сложнопрофильных элементов, исследовалась с помощью микроскопа и профилометра.

Результаты и обсуждение

Поверхность образца сразу после печати имеет технологическую наследственность в виде ярко выраженного чередования слоёв, перепады между которыми приводят к повышению шероховатости. После предлагаемого способа обработки в аэрозоле, полученным ультразвуковым распылением, материал на поверхности частично растворяется и в жидком состоянии заполняет впадины микронеровностей, что приводит к снижению шероховатости. В этом случае на поверхности визуально заметны «наплывы», являющиеся областями

взаимодействия поверхности и капелек растворителя.

Фотографии поверхности образцов представлены на рис. 6.

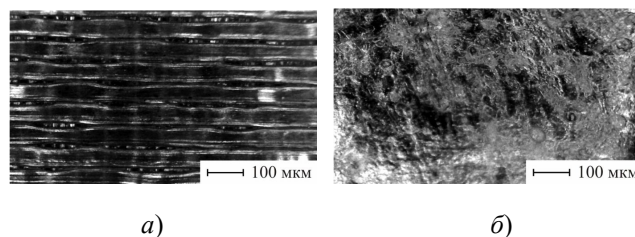


Рис. 6. Фотографии боковой поверхности образцов после:

a – 3D-печати; *б* – обработки в аэрозоле, полученном ультразвуковым распылением

Fig. 6. Photographs of sample side surface after having: *a* – 3D printing; *b* – aerosolizing, obtained through ultrasonic spraying

Количественные показатели изменения шероховатости и профилограммы поверхности представлены на рис. 7. Измерения проводились профилометром модели 130 при движении иглы в направлении, перпендикулярном направлению послойного роста изделия.

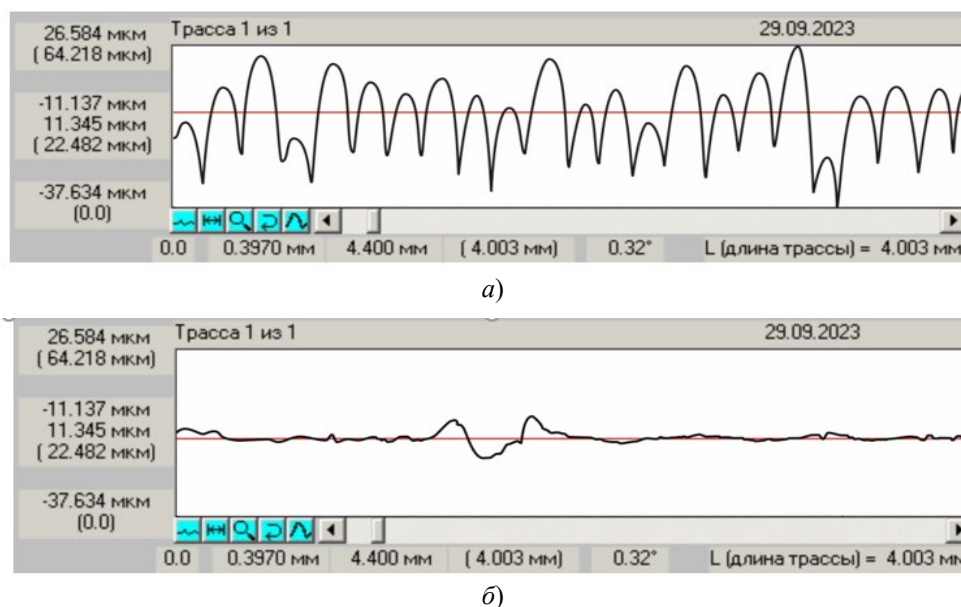


Рис. 7. Профилограммы и параметры шероховатости боковой поверхности образцов после:

a – 3D-печати: $R_a = 22,7$ мкм; $R_z = 85,8$ мкм; $S_m = 0,414$ мм; $S = 0,174$ мм; *б* – обработки в аэрозоле, полученном ультразвуковым распылением: $R_a = 1,34$ мкм; $R_z = 6,9$ мкм; $S_m = 0,213$ мм; $S = 0,007$ мм

Fig. 7. Profilograms and roughness parameters of sample side surface after having:

a – 3D printing: $R_a = 22,7$ mkm; $R_z = 85,8$ mkm; $S_m = 0,414$ mm; $S = 0,174$ mm; *b* – aerosolizing, obtained through ultrasonic spraying: $R_a = 1,34$ mkm; $R_z = 6,9$ mkm; $S_m = 0,213$ mm; $S = 0,007$ mm

В результате обработки в аэрозоле растворителя происходит снижение высотных параметров шероховатости: среднего арифметического отклонения профиля Ra в 17 раз, высоты неровностей профиля по десяти точкам Rz в 12 раз. В результате происходит значительное повышение качества поверхности. Снижение шаговых параметров Sm и S связано с изменением положения средней линии, т. е. в расчёте параметров учитывается большее количество выступов маленького размера, образованных в результате растворения и дальнейшей полимеризации материала.

Выводы

В результате экспериментальных исследований по финишной обработке пластиковых деталей, изготовленных методом FDM-печати, в аэрозоле растворителя, полученным методом ультразвукового распыления, установлено что:

- метод эффективен для снижения шероховатости сложнопрофильных участков поверхности;
- механизм изменения микрогеометрии поверхности, следующий: при попадании капель аэрозоля на поверхность, часть материала, образующего выступы, растворяется и в жидком состоянии заполняет впадины; после окончания обработки материал полимеризуется, образуя поверхность с улучшенными характеристиками;
- снижение высотных параметров шероховатости составляет более, чем в 10 раз;
- широкие возможности управления параметрами получаемого в результате ультразвукового распыления аэрозоля позволяют использовать метод для различных задач в зависимости от геометрии обрабатываемой поверхности, начальной и требуемой шероховатости;
- отсутствие нагрева растворителя снижает его химическую активность (по сравнению с аэрозолем, полученным в результате испарения растворителя), что дает возможность проведения более тонкой обработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dilberoglu U.M. et al. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0 // *Procedia manufacturing*. 2017. V. 11. P. 545–554. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.

2. Gardan J. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends // *Additive Manufacturing Handbook*. 2017. P. 149–168. DOI: 10.1080/00207543.2015.1115909.

3. Конов С.Г., Котобан Д.В., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Перспективы применения ультразвуковых технологий в аддитивном производстве // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2015. № 9 (51). С. 28–34.

4. Gordelier T.J. et al. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: A state-of-the-art review // *Rapid Prototyping Journal*. 2019. T. 25. Iss. 6. P. 953–971. DOI: 10.1108/RPJ-07-2018-0183.

5. Тимофеева А.Г., Баурова Н.И. Перспективы применения вторичных нетканых материалов в качестве армирующего наполнителя композитов в машиностроении // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2023. № 1. С. 29–32. DOI 10.31044/1994-6260-2023-0-1-29-32.

6. Волченкова, А.А., Галкина Е.А., Баурова Н.И. Оценка влияния условий хранения дисперсных и волокнистых наполнителей на свойства композитов на их основе // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2023. № 2. С. 27–31. DOI 10.31044/1994-6260-2023-0-2-27-31.

7. Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. [и др.] Пути совершенствования аддитивных технологий с помощью ультразвука // *СТИН*. 2017. № 7. С. 2–6.

8. Сундуков С. К. Подготовка эпоксидного клея методом ультразвуковой обработки // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2023. № 9. С. 32–40. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-0-9-32-401.

9. Bram Verhaagen, Thijs Zanderink, David Fernandez Rivas. Ultrasonic cleaning of 3D printed objects and Cleaning Challenge Devices // *Applied Acoustics*. Vol. 103, Part B. 2016. P. 172–181. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.06.010

10. Александров В.А., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С., Филатова А.А. Ультразвуковые способы повышения качества поверхности изделий, полученных методом селективного лазерного плавления порошков коррозионно-стойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. № 6 (756). С. 42–47.

11. Slegers S. et al. Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating // *Coatings*. 2017. V. 7. Iss. 12. P. 208. DOI: doi.org/10.3390/coatings7120208.

REFERENCES

1. Dilberoglu U.M. et al. The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0 // *Procedia manufacturing*. 2017. V. 11. P. 545–554. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.

2. Gardan J. Additive manufacturing technologies: state of the art and trends // *Additive*

Manufacturing Handbook. 2017. P. 149–168. DOI: 10.1080/00207543.2015.1115909.

3. Konov S.G., Korban D.V., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Prospects of ultrasonic technologies application for additive manufacturing // Scienceintensive technologies in mechanical engineering, 2015, No. 9 (51), pp. 28–34.

4. Gordelier T.J. et al. Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: A state-of-the-art review // Rapid Prototyping Journal. 2019. T. 25. Iss. 6. P. 953–971. DOI: 10.1108/RPJ-07-2018-0183.

5. Timofeeva A.G., Baurova N.I. Prospects for the use of recycled nonwoven fabric as a reinforcing filler of composites in mechanical engineering industry // All the Materials. Encyclopedic Reference Book, 2023, No. 1, pp. 29–32. DOI 10.31044/1994-6260-2023-0-1-29-32.

6. Volchenkova, A.A., Galkina E.A., Baurova N.I. An evaluation of the influence of storage conditions for dispersed and fibrous fillers on the properties of composites based on them // All the Materials. Encyclopedic Reference Book, 2023, No. 2, pp. 27–31. DOI 10.31044/1994-6260-2023-0-2-27-31.

7. Nigmatzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. [et al.] Ways of improving additive technologies using ultrasound // STIN, 2017, No. 7, pp. 2–6.

8. Sundukov S. K. Preparation of epoxy glue by ultrasonic treatment // Glues. Sealants. Technologies, 2023, No. 9, pp. 32–40. DOI: 10.31044/1813-7008-2023-0-9-32-401.

9. Bram Verhaagen, Thijs Zanderink, David Fernandez Rivas. Ultrasonic cleaning of 3D printed objects and Cleaning Challenge Devices // Applied Acoustics. Vol. 103, Part B. 2016. P. 172–181. DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.06.010

10. Alexandrov V.A., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S., Filatova A.A. Ultrasonic methods for improving object surface quality prepared by corrosion-resistant steel powder selective laser melting // Metal Science and Heat Treatment, 2018., No. 6 (756), pp. 42–47.

11. Slegers S. et al. Surface roughness reduction of additive manufactured products by applying a functional coating using ultrasonic spray coating // Coatings. 2017. V. 7. Iss. 12. P. 208. DOI: doi.org/10.3390/coatings7120208.

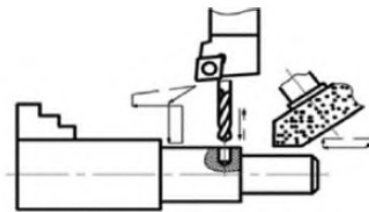
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 02.10.2023; одобрена после рецензирования 12.10.2023; принята к публикации 20.10.2023.

The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 12.10.2023; assepted for publication 20.10.2023.





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №12 (150). С.23-29.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №12 (150). P.23-29.

Научная статья

УДК 621.91

doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-29

Исследование эффективности методики коррекции режима процесса механической обработки с изменяющимися во времени параметрами в условиях неопределенности технологической информации

Александр Николаевич Унянин¹, д.т.н.

Павел Рамдисович Финагеев², вед. инж.-констр.

¹ ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», Ульяновск, Россия

² АО «Фрест», Ульяновск, Россия

¹ a_un@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5557-4197>

² pavel_finageev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5143-7929>

Аннотация. Разработана методика коррекции режима механической обработки с изменяющимися во времени параметрами. Методика позволяет минимизировать влияние неопределенности технологической информации, обусловленной некорректностью математических зависимостей и моделей, используемых для расчета параметров процесса, и отсутствием исходных данных для выбора параметров математических моделей, и предусматривает коррекцию зависимостей и моделей по данным текущей информации о выходных параметрах. Коррекция элементов режима выполняется по результатам сравнения расчётных и фактических значений выходных и текущих параметров процесса. Определяются расчётные функции изменения выходных параметров во времени. Методика определения взаимосвязанных текущих и выходных параметров процесса обработки позволяет рассчитать их значения в зависимости от времени наработки инструмента. По результатам сравнения расчётных значений параметров процесса со значениями, которые должны быть получены в момент времени, равный периоду стойкости инструмента, выполняется коррекция элементов режима. Если расчётные значения выходных параметров не превышают их предельные значения, то следует интенсифицировать режим обработки, чтобы увеличить производительность. Определяются интервалы варьирования управляемыми факторами, позволяющие изменить выходные параметры в момент, равный периоду стойкости инструмента, на необходимую величину. При расчетах интервалов варьирования управляемыми факторами на первых этапах коррекции режима ориентируются на исходные модели и зависимости, описывающие процесс. Необходимый результат может быть не достигнут по причине неопределенности информации, в том числе некорректности моделей. Поэтому при необходимости реализуются последующие этапы коррекции режима. Ориентируясь на фактические значения выходных параметров, корректируются модели процесса, а интервалы варьирования управляемыми параметрами рассчитываются с использованием скорректированных моделей. Применение разработанной методики коррекции режима позволяет увеличить производительность точения на 30...35 % при обеспечении на протяжении заданного периода стойкости инструмента требуемого качества обработанных деталей.

Ключевые слова: точение, режим обработки, неопределенность, технологическая информация, коррекция, шероховатость, погрешность

Для цитирования: Унянин А.Н., Финагеев П.Р. Исследование эффективности методики коррекции режима процесса механической обработки с изменяющимися во времени параметрами в условиях неопределенности технологической информации // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-29

Study of the technique performance for the correction of the mode of the machining process with time-varying parameters in the conditions of technological information uncertainty

Alexander N. Unyanin¹, D. Eng.

Pavel R. Finageev², PDE

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

² JSC «Frest», Ulyanovsk, Russia

¹ a_un@mail.ru

² pavel_finageev@mail.ru

Abstract. A technique for correcting a machining mode with time-varying parameters has been developed. The technique allows minimizing the impact of the uncertainty of technological information caused by the incorrectness of mathematical dependencies and models used for calculating the parameters of the process or due to the lack of initial data for the selection of parameters of mathematical models. It provides for the corrective dependencies and models according to the current information with respect to the output parameters. The correction of the mode elements is performed according to the results of comparing the calculated and actual values of the output and current process parameters. The calculated functions of changing the output parameters over time are determined. The routine for determining the interrelated current and output parameters of the processing process allows calculating their values depending on the operating time of the tool. According to the results of comparing the calculated values of the process parameters with the values that should be obtained at a time equal to the efficient tool life, the correction of the mode elements is performed. If the calculated values of the output parameters do not exceed their limit values, then the operation mode should be intensified for the sake of increasing productivity. The intervals of variation by controlled factors are determined, which allow changing the output parameters at a time equal to the efficient tool life by the desired value. When calculating the intervals of variation by controlled factors at the first stages of mode adjustment, they are guided by the initial models and dependencies describing the process. The necessary result may not be achieved due to the uncertainty of the information, including the incorrectness of the models. Therefore, if necessary, the subsequent stages of mode adjustment are put into operation. Based on the actual values of the output parameters, the process models are adjusted, and the variation intervals by controlled parameters are calculated using adjusted models. The application of the developed method of mode correction makes it possible to increase the turning performance by 30...35 % while ensuring the required quality of the machined parts within a given period of tool durability.

Keywords: turning, operation mode, uncertainty, technological information, adjustment, roughness, error

For citation: Unyanin A.N., Finageev P.R. Study of the technique performance for the correction of the mode of the machining process with time-varying parameters in the conditions of technological information uncertainty / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 23–29. doi: 10.30987/2223-4608-2023-23-29

Проблема назначения рационального режима процесса механической обработки является одной из важнейших в области металлообработки. От режима зависит производительность процесса, качество и стоимость изготовленных деталей.

Эффективным методом назначения режима является расчётный, предусматривающий использование математических зависимостей и моделей, связывающих выходные и входные параметры процесса обработки. Однако, используемые зависимости и модели не всегда корректно отражают взаимосвязь параметров процесса. Многие модели не учитывают влияния ряда управляемых и неуправляемых параметров процесса. Часто отсутствует информация, необходимая для расчета. Многие зависимости и модели получены

эмпирическим путём и показывают адекватные результаты лишь в тех условиях, в которых они были получены. В каталогах режущего инструмента элементы режима резания указаны, как правило, диапазоном значений, что осложняет выбор рационального режима. Поэтому часто возникает необходимость коррекции назначенного режима.

Износ режущего инструмента, а следовательно, силы резания, температура в зоне резания и параметры качества изготовленных деталей изменяются с увеличением времени работы инструмента. Колебания припуска и твердости материала заготовки, изменение жесткости технологической системы и другие неуправляемые факторы также влияют на выходные параметры процесса. Вышеприведённые причины ведут к неопределённости

информации, связанной с отсутствием корректных математических моделей и исходных данных для расчета выходных параметров в зависимости от условий обработки и элементов режима резания.

Одним из способов повышения эффективности механической обработки является применение систем автоматического управления станками. Системы с обратной связью позволяют компенсировать возмущающие факторы как систематического, так и случайного характера (колебания механических свойств материала заготовки, припуска на обработку и др.) и обеспечить заданное качество деталей при максимально возможной производительности. Разработаны системы управлением параметрами качества поверхностного слоя заготовки, в том числе микрогеометрией [1, 2].

Система автоматического управления режимом резания на основе нечёткой логики позволяет при различных режимах обработки поддерживать тангенциальную составляющую силы резания и температуру в зоне обработки на постоянном уровне [3]. Недостатком данной системы является то, что она не позволяет адекватно оценить износ инструмента и его влияние на выходные параметры (шероховатость и микротвёрдость поверхностного слоя, точность размеров и др.).

А. Аласкари и С.Е. Ораби разработали адаптивную систему управления процессом черновой токарной обработки [4]. Авторы предлагают подход, основанный на применении рекурсивных непрерывных итераций для прогнозирования (расчёта) величины износа резца по задней поверхности, сил резания и потребляемой мощности. Исследования выполнены с целью обеспечения максимальной скорости съёма материала заготовки. Однако, авторы не учли влияние изменения элементов режима на выходные параметры процесса обработки, в том числе на параметры качества деталей.

Количество выходных и текущих параметров, по результатам измерения которых вырабатывается управляющее воздействие с помощью большинства систем автоматического управления, ограничено: большинство систем реагируют лишь на один параметр (чаще всего параметр шероховатости

обработанной поверхности или упругую деформацию одного из элементов технологической системы), а из всего разнообразия управляющих воздействий также выбирается лишь одно – в большинстве случаев скорость подачи. Если управляющее воздействие определять, ориентируясь лишь на один выходной или текущий параметр процесса, то можно получить недопустимые значения других параметров.

А.Н. Иноземцев [5] предложил метод рекурсивного стохастического самообучения, однако технологический процесс представлен как система с одним управляемым (скорость резания) и одним выходным (период стойкости инструмента) параметром.

Анцев А.В. разработал зависимости для расчета периода стойкости режущего инструмента, которые учитывают стохастичный характер процесса резания, и методику назначения оптимальных режимов резания, предусматривающую обработку с максимально возможными значениями подачи, глубины и скорости резания, ограниченной экономической скоростью и скоростью, обеспечивающей максимальную производительность [6].

Перспективными являются системы, которые позволяют управлять значениями выходных параметров (шероховатость обработанной поверхности и размер детали) с учетом изменяющихся во времени параметров обработки [7].

Одним из путей уменьшения неточностей при расчете или назначении элементов режима в условиях неопределенности технологической информации является коррекция (подстройка) параметров математических моделей, отражающих взаимосвязь выходных и входных параметров, по данным текущей информации о выходных параметрах [8].

Цель исследований – оценка эффективности функционирования разработанной методики коррекции режима обработки, учитывающей изменение параметров процесса с увеличением времени наработки инструмента.

Разработанный алгоритм коррекции режима резания (рис. 1) позволяет учесть взаимное влияние текущих показателей процесса резания (износа инструмента, силы и температуры резания).

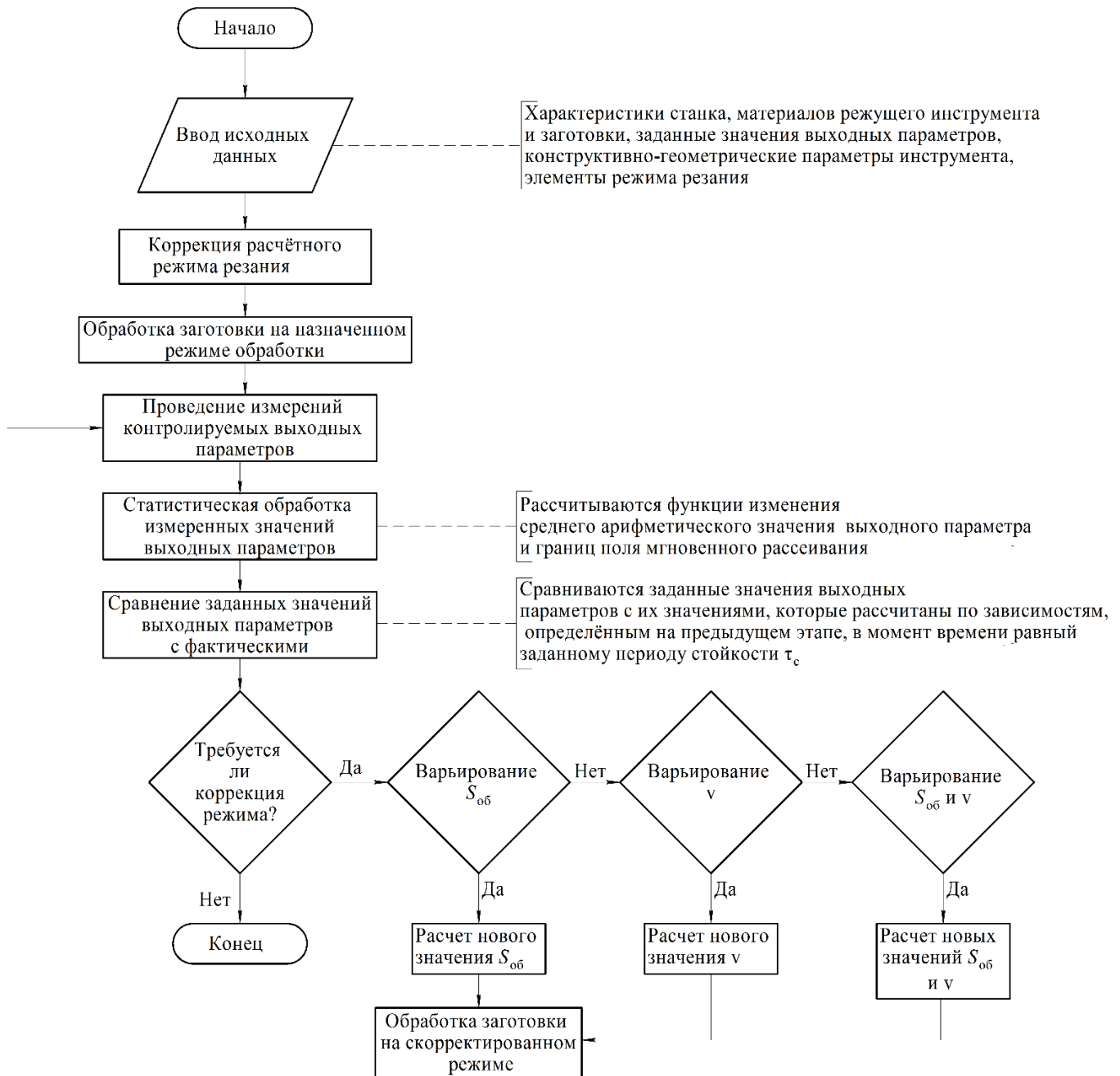


Рис. 1. Алгоритм коррекции режима резания:
 $S_{об}$ – подача инструмента; v – скорость резания

Fig. 1. Algorithm for adjusting the cutting mode:
 S_r – tool feed; v – cutting speed

Для этого предложен следующий подход. Время функционирования процесса обработки разбивается на интервалы Δt (рис. 2). Расчёты выходных и текущих параметров процесса выполняются для моментов времени $t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_{max}$.

На первом этапе назначается режим обработки по каталогу режущего инструмента

или рассчитывается по формулам теории резания. При необходимости производится коррекция назначенного (расчётного) режима с целью обеспечения заданного качества обработанных деталей при максимальной производительности процесса обработки. Для этого определяются расчётные функции изменения выходных параметров во времени. Сравниваются

расчётные значения выходных параметров, которые должны быть получены в момент времени, равный периоду стойкости инструмента, с предельными (заданными) значениями выходных параметров. Производится коррекция режима, в результате которой обеспечивается резерв, равный нулю, по крайней мере, одного из выходных параметров процесса, при условии, что остальные выходные параметры будут иметь положительный резерв (запас). (Под резервом понимается разница между заданным (предельным) значением какого-либо выходного параметра и его расчетным или фактическим значением).

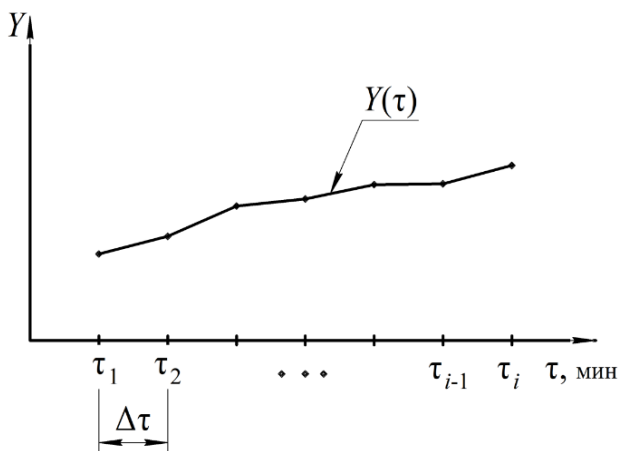


Рис. 2. Траектория изменения выходного параметра Y с увеличением времени наработки инструмента τ

Fig. 2. Trajectory of change of the output parameter Y with an increase in the operating time of the tool τ

На скорректированном режиме производится обработка партии заготовок и измеряются выходные параметры (например, параметры шероховатости обработанной поверхности и размер обработанной детали). Затем производится статистическая обработка фактических (измеренных) значений выходных параметров по методике, приведенной в работе [9], что позволяет определить фактические траектории изменения выходных параметров от времени наработки инструмента. Для статистической обработки фактических значений выходных параметров разработано программное обеспечение.

Если при назначенном режиме значение хотя бы одного выходного параметра в момент времени, равный периоду стойкости режущего инструмента, превышает предельное

(заданное) значение этого параметра, следует изменить (уменьшить) элементы режима, чтобы не допустить появления бракованных изделий. Если фактические значения выходных параметров не превышают их предельных значений, то следует интенсифицировать режим обработки, чтобы увеличить производительность.

Если принято решение корректировать подачу $S_{об}$ и скорость резания v , то следует выбрать один из трех возможных вариантов варьирования этими параметрами:

- варьирование только подачей $S_{об}$;
- варьирование только скоростью резания v ;
- варьирование подачей $S_{об}$ и скоростью резания v .

После выбора варианта варьирования рассчитываются скорректированные элементы режима и на этом режиме производится обработка заготовок.

Для коррекции режима точения в условиях существенного изменения параметров процесса с течением времени разработана программа «Коррекция режима точения в условиях неопределенности технологической информации», которая зарегистрирована в государственном Реестре программ для ЭВМ. Программа позволяет рассчитать выходные параметры в зависимости от времени наработки инструмента: производственную погрешность диаметральных размеров деталей ω и параметр шероховатости Ra их поверхностей. Это даёт возможность оценить изменение её параметров с увеличением времени наработки инструмента и определить период его стойкости.

Программа разработана на языке программирования Delphi, который используется в одноимённой среде разработки Delphi 7. В качестве исходных данных необходимо ввести элементы режима точения (скорость резания v , подача $S_{об}$ и глубина резания t_r), параметры станка (мощность и КПД двигателя, жёсткость станка, диапазоны частот вращения шпинделя и подач), конструктивные параметры резца (передний угол γ , главный ϕ и вспомогательный ϕ_1 углы в плане, угол наклона передней поверхности λ , радиус при вершине режущей кромки r , ширина B и высота державки H , вылет резца из резцедержателя), материалы заготовки, режущей части инструмента и державки резца и др.

Экспериментальные исследования были проведены при следующих условиях. Обрабатывали точением наружные цилиндрические поверхности заготовок диаметром 50 мм из стали 12X18H10T проходным резцом со сменной многогранной твердосплавной пластиной из сплава T15K6 на токарном станке с ЧПУ CTX310 Ecoline.

Заданное (предельное) значение шероховатости обработанной поверхности $Ra = 3,2$ мкм; допуск диаметрального размера составляет 0,1 мм (по 10 качеству). Период стойкости инструмента $t_c = 30$ мин.

Исследование проведено в следующей последовательности:

1. По формулам теории резания [10] произведен расчет элементов режима точения заготовки из 12X18H10T: $S_{об} = 0,11$ мм/об; $v = 146$ м/мин.

2. По результатам расчета выходных параметров (параметра шероховатости Ra и погрешности диаметрального размера ω) на назначенном режиме был получен положительный резерв по параметру Ra и отрицательный резерв по значению параметра ω . Поскольку расчетная погрешность диаметрального размера превышает допуск, необходимо выполнить коррекцию рассчитанного режима обработки. Скорректированный режим должен обеспечить резерв одного из параметров, равный нулю, при положительном резерве второго выходного параметра. С применением разработанного программного обеспечения получили скорректированный режим: $S_{об} = 0,11$ мм/об; $v = 142$ м/мин.

3. При обработке на скорректированном режиме выходные параметры (параметр шероховатости Ra и диаметральный размер) измеряли на ограниченном отрезке времени наработки инструмента, равном 0...5,63 мин (меньшим, чем период стойкости), а затем экстраполировали на время, равное периоду стойкости. Выполнив обработку результатов по методике [9], получили значения выходных параметров в момент времени $t_c = 30$ мин: шероховатости – $Ra_{\phi}^0 = 1,95$ мкм и погрешности диаметрального размера – $\omega_{\phi}^0 = 0,05$ мм. Следовательно, могут быть получены положительные резервы (запасы) по параметру шероховатости Ra_{ϕ} и погрешности диаметрального

размера ω_{ϕ} . Поэтому имеется возможность интенсифицировать режим обработки.

Разработанная программа позволила рассчитать новые значения управляемых параметров: $S_{об} = 0,168$ мм/об; $v = 140$ м/мин. Выходные параметры (шероховатость и диаметр обработанной поверхности) заготовок, обработанных на данном режиме, измеряли на отрезке времени, равном периоду стойкости резца и получили фактические значения выходных параметров: $Ra_{\phi}^1 = 2,84$ мкм и $\omega_{\phi}^1 = 0,04$ мм. Обработка на скорректированном режиме ($S_{об} = 0,168$ мм/об; $v = 140$ м/мин) позволяет увеличить производительность процесса точения на 34 % по сравнению с назначенным режимом при обеспечении заданного качества деталей.

Аналогичные эксперименты выполнены также при следующих условиях: материал заготовок – 12X18H10T; режущий инструмент – резец MSDNN 2020K12; режущая пластина (СМП) – SNMG 120404-SFIS7015 (ф. InTool) с износостойким покрытием TiAlN. Требуемое значение шероховатости $Ra = 1,6$ мкм; диаметральный размер (по восьмому качеству) – $\phi 34h8 (-0,039)$ мм. Режим резания был назначен по каталогу производителя инструмента: $S_{об} = 0,080$ мм/об; $v = 250$ м/мин; $t_r = 0,5$ мм.

Использование скорректированного режима ($S_{об} = 0,129$ мм/об; $v = 250$ м/мин; $t_r = 0,5$ мм) позволяет повысить производительность обработки партий образцов из 12X18H10T на 33 % по сравнению с назначенным режимом. При этом на протяжении заданного периода стойкости $t_c = 30$ мин обеспечивается заданный параметр шероховатости Ra и точность диаметрального размера.

ВЫВОДЫ

1. Выполнены исследования эффективности методики коррекции, назначенного в условиях неопределённости технологической информации режима токарной обработки с учетом изменяющихся во времени параметров процесса.

2. Применение разработанной методики позволяет увеличить производительность точения на 30...35 % при обеспечении на протяжении заданного периода стойкости инструмента требуемого качества обработанных деталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Инженерия** поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2008. 320 с.
2. **Суслов А. Г.** Самообучающиеся автоматизированные технологические системы / А.Г. Суслов, Д.И. Петрешин, Д.Н. Финатов. Справочник. Инженерный журнал. № 1. 2004. С. 14–17.
3. **Зориктуев В.Ц., Шангареев Р.Р.** Система автоматического управления режимами резания на основе нечеткой логики // Вестник УГАТУ. 2010. Т.14, № 2 (37). С. 163–169.
4. **Alaskari A.** Adaptive control simulation to optimize metal removal for rough turning / A. Alaskari, S.E. Oraby // Journal of Engineering Research. 2018, Vol. 6. № (2). pp. 20–231.
5. **Теоретико-вероятностный** анализ производительности станочных систем / С.А. Васин, А.Н. Иноземцев, Н.И. Пасько. Тульский гос. ун-т. Тула: ТулГУ, 2002. 276 с.
6. **Анцев А.В.** Учет разброса периода стойкости при оптимизации режимов резания и профилактической замены инструмента / А.В. Анцев, Н.И. Пасько // Вестник машиностроения. № 9. 2019. С. 72–77.
7. **Ulsoy A.G., Koren Y.** Control of machining processes. ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control. 1993, 115, 301–308. DOI: 10.1115/1.2899070.
8. **Unyanin A.N.** Development of methodology for the purpose of the machining process mode with time-varying parameters in the face of uncertainty of technological information / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 709 (2020). 022034. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022034.
9. **Унянин А.Н.** Статистический анализ параметров процесса механической обработки / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Горное оборудование и электромеханика. № 6. 2019. С. 48–54. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-48-54.
10. **Прогрессивные** режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / В.И. Баранчикова

и др.; под общ. ред. В.И. Баранчикова. М.: Машиностроение, 1990. 399 с.

REFERENCES:

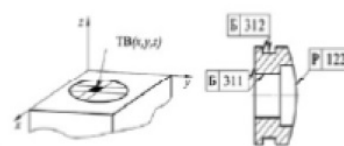
1. Suslov A.G. (2008) Surface engineering of parts. Machine Building, Moscow.
2. Suslov A.G., Petreshin D.I., Finatov D.N. (2004) Self-learning automated technological systems. SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal, № 1, pp. 14–17.
3. Zoriktuev V.Ts., Shangareev R.R. (2010) Automatic control of cutting modes based on fuzzy logic. Vestnik UGATU, V.14, № 2 (37), pp. 163–169.
4. Alaskari A. Adaptive control simulation to optimize metal removal for rough turning / A. Alaskari, S.E. Oraby // Journal of Engineering Research. 2018, Vol.6. № (2) pp. 209–231.
5. Vasin S.A., Inozemtsev A.N., Pasko N.I. (2002) Theoretical and probabilistic analysis of machine system performance. TulaStateUniversity, Tula.
6. Antsev A.V. Taking into account the spread of the service life when optimizing cutting modes and preventive replacement of tools / A.V. Antsev, N.I. Pasko // Bulletin of mechanical engineering. No. 9. 2019. pp. 72–77.
7. Ulsoy A.G., Koren Y. Control of machining processes. ASME J. Dyn. Sys. Meas. Control. 1993, 115, 301–308. DOI:10.1115/1.2899070.
8. Unyanin A.N. Development of methodology for the purpose of the machining process mode with time-varying parameters in the face of uncertainty of technological information / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // IOP Conf. Series: MaterialsScienceandEngineering.709 (2020). 022034. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022034.
9. Unyanin A.N. Statistical analysis of the parameters of the machining process / A.N. Unyanin, P.R. Finageev // Mining equipment and electromechanics. No. 6. 2019. pp. 48 – 54. DOI: 10.26730/1816-4528-2019-6-48-54.
10. Progressive cutting tools and metal cutting modes: Handbook / V.I. Baranchikova et al.; Under the general editorship of V.I. Baranchikova. M.: Mashinostroenie, 1990. 399 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 21.06.2023; одобрена после рецензирования 27.06.2023; принята к публикации 05.07.2023.

The article was submitted 21.06.2023; approved after reviewing 27.06.2023; assepted for publication 05.07.2023.



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №12 (150). С.30-36.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №12 (150). P.30-36.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-36

Повышение качества технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе расширенного анализа конструктивных характеристик деталей

Петр Юрьевич Бочкарев¹, д.т.н.

Евгения Павловна Решетникова², к.т.н.

^{1, 2} Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический университет», Камышин, Россия

¹ Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии инженерии
имени Н.И. Вавилова, Саратов, Россия

¹ bpy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

² purpose22@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8682-964X>

Аннотация. Представлен методический подход к формированию и описанию данных по конструкторско-технологическим характеристикам деталей при технологической подготовке механообрабатывающих производств, отличием, которого от известных является учет дополнительных сведений, не содержащихся в явном виде в конструкторской документации. В качестве дополнительной информационной составляющей предложено использовать: сведения о взаимовлиянии при обработке одной элементарной поверхности на одну или несколько размерных характеристик других поверхностей; данные о размерных характеристиках каждой элементарной поверхности не представленные на чертежах; предельные отклонения от геометрической формы элементарных поверхностей и взаимном расположении между элементарными поверхностями; сведения о конструкторских базах рассматриваемой детали. Формирование базы данных об обрабатываемых деталях представлено в виде графов, что позволяет использовать широкий спектр математического аппарата при создании формализованных моделей и обеспечивает несложную их адаптацию для использования в существующих системах автоматизированного проектирования. Анализ дополнительных конструкторско-технологических параметров позволяет оценить взаимозависимости размеров и характеристик каждой из поверхностей детали с параметрами других поверхностей, обеспечивая качество принятия решений на этапах технологической подготовки на основе повышения степени достоверности информационных потоков. Полученные результаты расширяют возможности проведения разменного анализа установочных, операционных и межоперационных связей разрабатываемых технологических процессов, повышая уровень автоматизации проектных процедур. Созданные графические модели, направленные на снижение сложности описания проектных действий, расширяют, за счет приближения к традиционному описанию сведений о технологическом оборудовании, возможности учета состояния производственных мощностей механообрабатывающего производства в реальном масштабе времени, и способствуют решению современных вопросов по созданию эффективных машиностроительных комплексов.

Ключевые слова: механообрабатывающие производства, технологическая подготовка производства, конструкторско-технологические характеристики деталей, технологические процессы механообработки, размерные технологические связи, графы технологических процессов, системы автоматизированного проектирования

Для цитирования: Бочкарев П.Ю., Решетникова Е.П. Повышение качества технологической подготовки механообрабатывающих производств на основе расширенного анализа конструктивных характеристик деталей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 30–36. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-36

Work preparation upgrading for machining industries based on an expanded analysis of parts design features

Pyotr Yu. Bochkarev¹, D. Eng.
Evgeniya P. Reshetnikova², Ph.D. Eng.

^{1,2} Kamyshtinsky Technological Institute (branch) of the Volgograd State Technical University,
Kamyshtin, Russia

¹ Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering
named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

¹ bpy@mail.ru

² purpose22@mail.ru

Abstract. A methodological approach to the formation and description of data on the design and technological features of parts under technological preparation of machining industries is presented, the difference, if compared to other well-known approaches, lies in recording of additional data that is not explicitly reflected in the reference design. As an additional information component, it is proposed to use: information on the mutual influence of one elementary surface on another or others, i.e. dimensioning specifications of other surfaces; data on the dimensional features of each elementary surface, which is not shown in the drawings; extreme geometric shape deviations for elementary surfaces and also mutual arrangement between elementary surfaces; data on the design bases of the part in question. The formation of a database of machined parts is given graphically, which makes it possible to use a wide range of mathematical tools technique in the creation of formalized models, providing their uncomplicated adaptation for using in existing computer-aided design systems. The analysis of additional design and technological parameters allows assessing the interdependence of the dimensions and characteristics of each of the part surfaces and the parameters of other surfaces, ensuring the quality of decision-making at the stages of technological preparation based on increasing the degree of reliability of information flows. The obtained results expand the possibilities of conducting dimensional analysis of the basic, operational and interoperation connections of the developed technical processes, increasing the level of automation in design procedures. Produced graphical models, aimed at reducing the complexity of design actions outline, are able to expand, due to the approximation to the traditional data specification of technological equipment, the possibility of taking into account the state of production capacities in machining production on a real time scale. They also contribute to the deciding modern issues on effective engineering complexes formation.

Keywords: machining industries, technological preparation of production, design and technological features of parts, technological processes of machining, dimensional and technological relations, graphs of technical processes, CAD (computer-aided design) systems

For citation: Bochkarev P.Yu., Reshetnikova E.P. Work preparation upgrading for machining industries based on an expanded analysis of parts design features / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P. 30–36. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-36

Введение

Разработка технологических процессов (ТП) механообработки является наиболее сложной составляющей в организации производств машиностроительного профиля. Принятие комплекса решений на всех ее этапах связано не только с анализом огромного количества нормативно-справочной информации, но и с необходимостью владения данными о возможностях и состоянии оборудования, средств технологического оснащения, принципах и особенностях функционирования конкретной производственной системы, для реализации которой разрабатывается ТП. В связи с этим, в отличие от других областей деятельности, отсутствует возможность создания проектных групп, обеспечивающих проектирование ТП

для нескольких предприятий, преимущественно средних размеров. Только обладание информацией о состоянии производственных мощностей механообрабатывающего производства в реальном масштабе времени позволяет обеспечить не только эффективное производство, но и саму возможность изготовления заданной номенклатуры деталей. В настоящее время залогом выполнения технологической подготовки механообработки в таких условиях является квалификация и опыт технологов, обладающих необходимыми знаниями применительно к конкретному производству [1 – 3]. Однако факторы субъективизма при принятии ими проектных решений, объективной невозможности обобщить всю необходимую информацию и сделать выбор оптимальных ТП, а также острая кадровая нехватка таких

специалистов, приводит к длительным срокам создания ТП и низким технико-экономическим показателям функционирования предприятий машиностроительного комплекса.

Материалы и методы

Выход из создавшейся ситуации возможен только на основе глубокой формализации и алгоритмизации всего комплекса проектных процедур на этапах технологической подготовки, построенных на принципах не только взаимозависимости между собой, но и с этапами реализации ТП в конкретных производственных условиях [4, 5]. Представлению действий технологов при проектировании ТП в виде моделей и методик, позволяющих создать программное обеспечение, должны предшествовать серьезные исследования по определению и созданию баз используемых данных, включающих обоснование их структур, полноты, точности и правил обновления информационных массивов. В данной статье представлены исследования по развитию информационного сопровождения представления данных об обрабатываемых деталях, предпосылкой которых послужили возникающие сложности при создании системы планирования многономенклатурных технологических процессов.

Парадоксальный вывод можно сделать, проанализировав информационный комплекс, традиционно используемый при формализованном описании или создании цифрового двойника изделия [6 – 8], содержащийся в конструкторском чертеже, и сопоставив их с

данными, которыми на основе этого чертежа владеет технолог. Вывод – технолог «видит больше», возможно это является одной из причин сдерживающей активное создание систем автоматизированного проектирования ТП.

В работе последовательно описаны предложения по насыщению дополнительной информационной составляющей при формировании базы данных об обрабатываемой детали, представленной в виде графов, что на основе применения широкого спектра известных математических аппаратов позволяет создать формализованные модели для использования в системах автоматизированного проектирования.

В качестве наглядности предлагаемого подхода генерации дополнительной информации формируются графы на примере детали «Цанга» (рис. 1). Сформированные графы размерных связей между элементарными поверхностями детали «Цанга» с указанием взаимосвязанных: размерными характеристиками поверхностей; размерными характеристиками элементарных поверхностей; предельными отклонениями от геометрической формы элементарных поверхностей; взаимном расположении элементарных поверхностей; конструкторских базах, представлены на рис. 2 – 6, где каждой элементарной поверхности присвоен порядковый номер и указан тип поверхности в соответствии с классификатором [4, 9] в системе планирования многономенклатурных технологических процессов (в кружках).

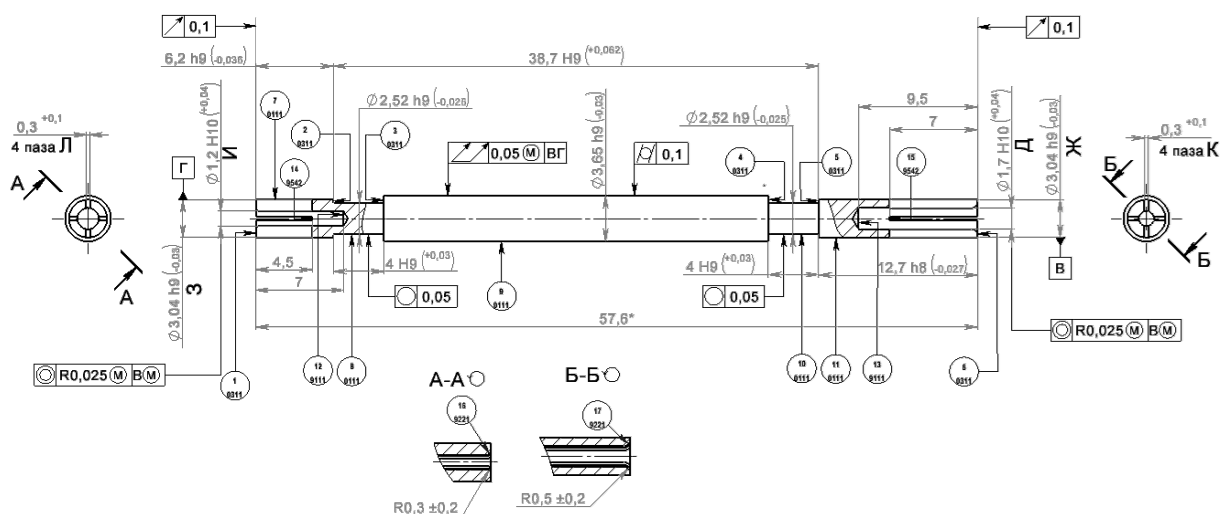


Рис. 1. Деталь «Цанга»

Fig. 1. Part «Tsanga»

Первыми в качестве дополнительной информации предлагается рассмотреть сведения о взаимовлиянии при обработке одной элементарной поверхности на одну или несколько размерных характеристик других поверхностей. Отсутствие данной взаимосвязи приводит не только к неопределенности в вопросах, связанных с формированием структуры маршрутных и операционных ТП, схем базирования, но и проведением оценки размерной точности проектируемых ТП [10, 11]. Графическим обозначением такого взаимовлияния является контакт между кружками, представляющими элементарные поверхности (рис. 2).

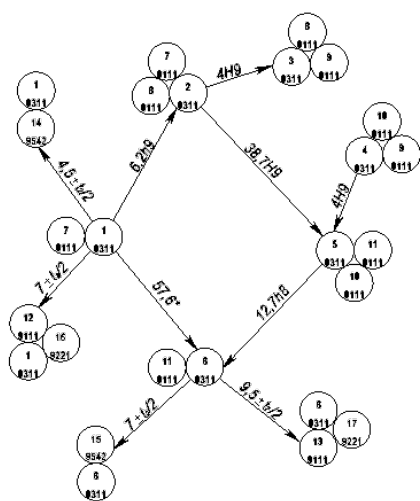


Рис. 2. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Цанга» с указанием взаимосвязанных размерных характеристик поверхностей

Fig. 2. Graph of dimensional relations between the elementary surfaces of the part «Tsanga», indicating the interrelated sizing features of the surfaces

В качестве следующей дополнительной информации, которой насыщается показанный на рис.1 граф, предлагается использовать данные о размерных характеристиках каждой элементарной поверхности в соответствии с их классификацией (код поверхности), представленные (рис. 3, *а*) и непредставленные (рис. 3, *б*) на конструкторском чертеже. Данная информация получается на основе пересчета размеров, представленных на конструкторском чертеже, и используется практически на всех этапах разработки ТП. Для поверхностей, имеющих ось вращения, на граф заносится соответствующая информация. Пересчет размеров и насыщение графа этой дополнительной информацией не представляется сложным и

при наличии конструкторского чертежа в электронном виде может быть выполнено в автоматизированном режиме.

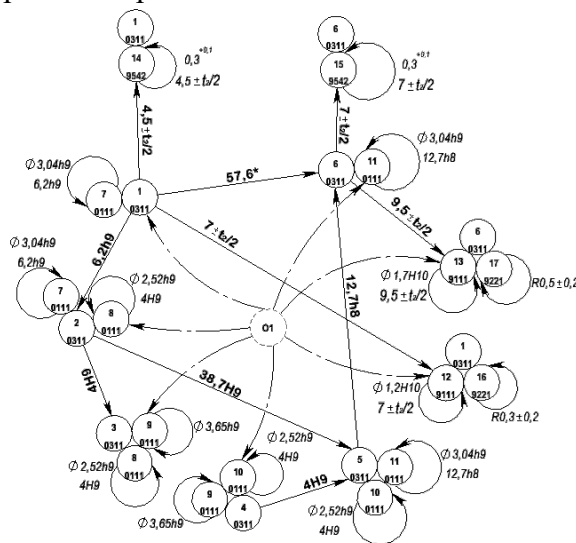


Рис. 3. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Цанга», насыщенный размерными характеристиками элементарных поверхностей:

a – обозначенными на конструкторском чертеже;
 b – дополненные

Fig. 3. Graph of dimensional relations between the elementary surfaces of the part «Tsanga», indicating the interrelated sizing features of the surfaces, sizing features of elementary surfaces

a – indicated in the design drawing; b – complemented

Представленный на рис. 3 граф насыщается требованиями, обозначенными на конструкторском чертеже, которые связаны с предельными отклонениями от геометрической формы

элементарных поверхностей (рис. 4) и взаимном расположении между элементарными поверхностями (рис. 5), что позволяет сформировать представление о конструктивных особенностях детали, как единой взаимосвязанной требованиями конструктора модели.

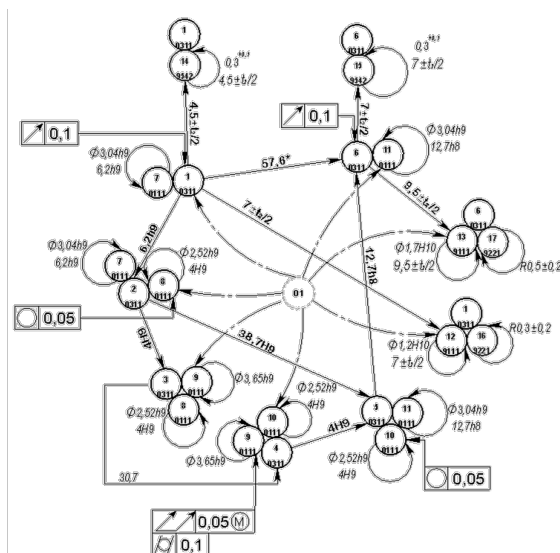


Рис. 4. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Цанга», насыщенный значениями предельных отклонений от геометрической формы элементарных поверхностей

Fig. 4. Graph of dimensional relations between elementary surfaces of the part «Tsanga», saturated with the values of maximum deviations from the geometric shape of elementary surfaces

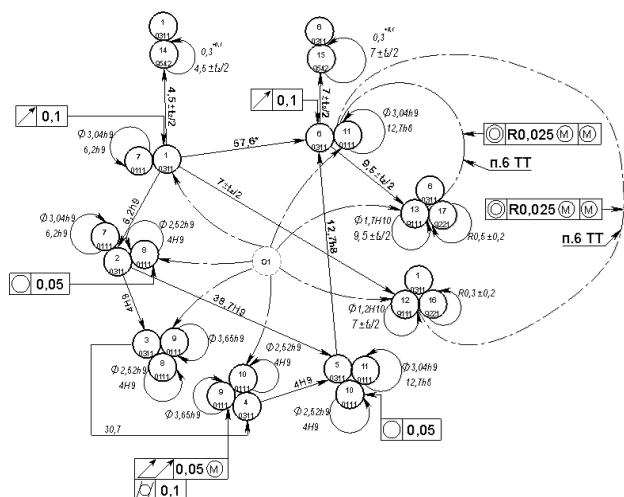


Рис. 5. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Цанга», насыщенный характеристикой взаимного расположения элементарных поверхностей

Fig. 5. Graph of dimensional relations between elementary surfaces of the part «Tsanga», saturated with characteristics of the relative position of the elementary surfaces

Другая важная информация, имеющая определяющее влияние при выборе технологических баз и обеспечения требований к степени относительной точности пространственных расположений элементарных поверхностей, содержится в сведениях о конструкторских базах рассматриваемой детали. Руководствоваться принципами единства и постоянства баз, а также реализации требований размерных взаимосвязей между поверхностями невозможно без наличия этих данных. На создаваемом графе предложено поверхности, являющиеся основными конструкторскими базами выделять «утолщенной» линией кружков, вспомогательными конструкторскими базами – «пунктирной» линией (рис. 6).

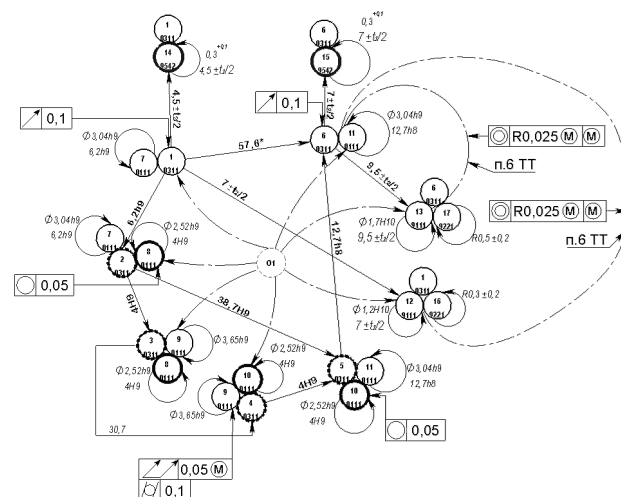


Рис. 6. Граф размерных связей между элементарными поверхностями детали «Цанга», насыщенный информацией о конструкторских базах детали

Fig. 6. Graph of dimensional relations between elementary surfaces of the part «Tsanga», rich information about design databases of parts

Описанное представление информации, содержащееся в конструкторском чертеже детали, сборочном чертеже как в форме значений и условных обозначений, так и в неявном виде, упорядочивает проведение проектного этапа анализа характеристик детали и отличается наглядностью. Это облегчает установление взаимосвязей конструкторско-технологических признаков поверхностей деталей с возможностью выполнения дальнейшей технологической подготовки производства с учетом возможностей конкретной производственной системы.

Результаты и обсуждение

Представленный метод анализа конструкторско-технологических параметров поверхностей изготавливаемых деталей обеспечивает в полном объеме формализованный учет взаимозависимости и взаимообусловленности значений их отдельных конкретных размеров и характеристик между собой. Представление дополнительных данных повышает уровень автоматизации и достоверности информационных потоков, качества технологической подготовки производства и проектирования интеллектуальной производственной системы.

Разработка рационального ТП является залогом повышения эффективности всего производственного процесса механообрабатывающих производств за счет сокращения временных и материальных ресурсов производства. Без поддержания активного курса на создание систем автоматизированного проектирования, способных адаптировать производственную систему к непрерывно изменяющимся производственным условиям и объектам производства, реализация ее невозможна. Представленные в статье результаты позволяют совершенствовать модели размерного анализа установочных, операционных и межоперационных связей, создаваемых ТП, исключая ошибки в их построении и устраняя препятствия к автоматизации проектных процедур такого рода.

Выводы

Методический подход, заключающийся в насыщении дополнительными сведениями по конструктивно-технологическим характеристикам обрабатываемых деталей систем автоматизированного проектирования, позволяет сформировать информационные процессы, обладающие недостающими скрытыми и неявными данными, владение которыми относились исключительно к компетенциям технологов на основе их знаний и опыта. Созданные графические модели пригодны и универсальны для использования их в существующих системах автоматизации механообрабатывающих производств, способствуют трансформации основ и концептуальных принципов технологической подготовки производства в развитии актуальных современных вопросов повышения

эффективности машиностроительных комплексов, направленных на их интеллектуализацию.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник технолога** / под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. **Базров Б.М.** Базис технологической подготовки машиностроительного производства: монография. М.: КУРС, 2023. 324 с.
3. **Васильев А.С., Дальский А.М., Золотаревский Ю.М., Кондаков А.И.** Направленное формирование свойств изделий машиностроения /под ред. А.И. Кондакова. – М.: Машиностроение, 2005. 352с.
4. **Бочкарёв П. Ю.** Системное представление планирования технологических процессов механообработки // *Технология машиностроения*. 2002. № 1. С. 10–14.
5. **Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М.** Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание // *Научные технологии в машиностроении*. 2022. № 8 (134). С. 39–48.
6. **Ингеманссон А.Р.** Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки // *Известия волгоградского государственного технического университета*. 2021. № 1 (248). С. 15–18.
7. **He B., Bai K.J.** Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review // *Adv. Manuf.* 2021. Vol. 9. P. 1–21.
8. **Tao F., Zhang M.** Digital twin shop-floor: a new shopfloor paradigm towards smart manufacturing // *IEEE Access*. 2018. Vol.5. P. 20418–20427.
9. **Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю.** Концепция группирования деталей механообрабатывающих производств при формировании рационального маршрута технологического процесса их изготовления // *Научные технологии в машиностроении*. 2021. № 3 (117). С. 19–25.
10. **Chakraborty S., Chowdhury R.** Graph-theoretic-approach-assisted Gaussian Process for Nonlinear Stochastic Dynamic Analysis Under Generalized Loading // *Journal of Engineering Mechanics*. 2019. Vol. 145. № 12. P. 04019105.
11. **Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю.** Принципы формирования комплекса контрольно-измерительных процедур в системе автоматизированного планирования производства // *Научные технологии в машиностроении*. 2022. № 11 (137). С. 25–31.

REFERENCES

1. The technologist's handbook under the general editorship of Suslov, A.G. Moscow. Innovative Mechanical Engineering, 2019, 800 p.
2. Bazrov B.M. Basis of technological preparation of machine-building production: monograph. Moscow: COURSE, 2023, 324 p.
3. Vasiliev A.S., Dalsky A.M., Zolotarevsky Yu.M., Kondakov A.I. Directed formation of properties of machine-building products /ed. by A.I. Kondakova. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 352p.
4. Bochkarev P.Yu. System representation of planning technological machining process // *Technologiya mashinostroeniya*, 2002, No. 1, pp. 10–14
5. Chigirinsky Yu.L., Krainev D.V., Frolov E.M. Digitalization of machine-building production: technological preparation, production, tracking // *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2022, No. 8 (134), pp. 39–48.
6. Ingemansson A.R. Basic framework of concept for technological preparation of production and adaptive management in digital production systems for machining operation // *Bulletin of Volgograd State Technical University*, 2021, No. 1 (248), pp. 15–18.
7. He B., Bai K.J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review // *Adv. Manuf.* 2021. Vol. 9. P. 1–21.
8. Tao F., Zhang M. Digital twin shop-floor: a new shop floor paradigm towards smart manufacturing // *IEEE Access*. 2018. Vol. 5. P. 20418–20427.
9. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. Parts grouping concept of machining production at efficient route formation of engineering process of their manufacturing// *Science-intensive technologies in mechanical engineering*, 2021, No. 3 (117), pp. 19–25.
10. Chakraborty S., Chowdhury R. Graph-theoretic-approach-assisted Gaussian Process for Nonlinear Stochastic Dynamic Analysis Under Generalized Loading // *Journal of Engineering Mechanics*. 2019. Vol. 145, No. 12. P. 04019105.
11. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. Developing models for planning characterization of the measuring - and-control's procedures for technical process of machinery production // *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2022, No. 11 (137), pp. 25–31.

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 27.09.2023; одобрена после рецензирования 13.10.2023; принята к публикации 27.10.2023.

The article was submitted 27.09.2023; approved after reviewing 13.10.2023; assepted for publication 27.10.2023.

Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. №12 (150). С.37-45.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №12 (150). P.37-45.

Научная статья

УДК 621.9

doi: 10.30987/2223-4608-2023-37-45

Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой

Максим Николаевич Нагоркин¹, Д.Т.Н.

Владимир Павлович Федоров², Д.Т.Н.

Анатолий Григорьевич Суслов³, Д.Т.Н.

Анатолий Васильевич Тотай⁴, Д.Т.Н.

^{1, 2, 3, 4}Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ nagorkin_mn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

² fedorvlad44@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2113-6567>

³ naukadm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2566-2759>

⁴ totai_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>

Аннотация. В статье представлены результаты исследований возможностей технологического управления формированием эксплуатационных параметров шероховатости трибоэлементов соединений трения скольжения комбинированными антифрикционными методами обработки. Возможности технологического управления параметрами шероховатости поверхностей деталей исследовались для двух вариантов обработки деталей – на основе нанесения твердых износостойких нитридсодержащих покрытий на поверхности деталей и на основе нанесения мягких медесодержащих прирабочных пленок на рабочие поверхности деталей в сочетании с методами обработки поверхностным пластическим деформированием. Поверхностное пластическое деформирование осуществлялось методами алмазного выглаживания или накатыванием шариком. В качестве управляющих факторов в экспериментальных исследованиях рассматривались как условия обработки поверхностей деталей, так и условия их приработки в парах трения скольжения. Приработка соединений осуществлялась на программируемом стенде (машине трения), позволяющем моделировать как статические нагрузки, так и динамические, изменяющиеся по периодическому закону с заданными параметрами. Были получены модели для количественной оценки влияния факторов обработки поверхностей деталей с применением антифрикционных технологий и дальнейшей их приработки в парах трения скольжения на формирование эксплуатационных параметров шероховатости, которые, в свою очередь, оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства трибоэлементов. Для оценки степени влияния технологических факторов обработки на формирование эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей осуществлялось их ранжирование методом Парето. Проводилась оценка степени согласованности влияния управляющих факторов на формирование параметров эксплуатационной шероховатости с помощью коэффициента ранговой конкордации. Представленная в статье информация необходима для практического применения в области проектирования технологических методов комбинированной антифрикционной обработки поверхностей деталей соединений трения скольжения машин и механизмов.

Ключевые слова: износостойкость, мягкие прирабочные пленки, нитридсодержащие покрытия, алмазное выглаживание, приработка, модели формирования параметров шероховатости

Для цитирования: Нагоркин М.Н., Федоров В.П., Суслов А.Г., Тотай А.В. Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 12 (150). С. 37–45. doi: 10.30987/2223-4608-2023-37-45

Technological control of surface operational roughness parameters for sliding friction pairs through combined antifriction surfacing

Maxim N. Nagorkin¹, D. Eng.

Vladimir P. Fedorov², D. Eng.

Anatoly G. Suslov³, D. Eng.

Anatoly V. Totay⁴, D. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract. The article presents study results of the technological control ways for roughness operational parameters generation in tribo-elements of sliding friction pairs through combined antifriction surfacing methods. The possibilities of technological control of the roughness parameters of the parts surfaces were studied for two types of part cutting – based on both: the application of hard wear-resistant nitride-containing coatings on the surfaces of parts and on the application of soft copper-containing work plates on the working surfaces of parts in combination with surface plastic deformation technique. Surface plastic deformation was carried out by diamond burnishing or ball burnishing. As controlling factors in experimental studies, both: the conditions for surfacing of parts and the run-in conditions in sliding friction pairs were viewed. Break-in process of pairs was carried out on a programmable testing unit (friction machine), which allows simulating both: static loads and dynamic loads that change together with the specified parameters in a periodic manner. Models for quantitative ratings of the influence of surfacing factors of parts using anti-friction technologies and their further development in sliding friction pairs on operational roughness parameters generation, which, in turn, have a significant impact on the operational properties of tribo-elements. To assess the degree of technological factors effect of the treatment on the generation of operational roughness of parts, their ranking by the Pareto method was carried out. The degree of consistency of control factors impact on operational roughness parameters generation was assessed using the coefficient of rank concordance. The information presented in the article is necessary for practical application in the field of designing technological methods of combined antifriction surfacing of parts for sliding friction pairs of machines and mechanisms.

Keywords: wear resistance, soft break-in films, nitride-containing coatings, diamond burnishing, break-in, models for roughness parameters generation

For citation: Nagorkin M.N., Fedorov V.P., Suslov A.G., Totai A.V. Technological control of surface operational roughness parameters for sliding friction pairs through combined antifriction surfacing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 12 (150). P. 37–45. doi: 10.30987/2223-4608-2023-37-45

Введение

В процессе приработки соединений трения скольжения на контактирующих поверхностях трибоэлементов формируются эксплуатационные (равновесные) параметры качества, числовые значения которых отличаются от параметров качества (технологических), полученных в процессе обработки. К ним в первую очередь относятся параметры шероховатости, физико-механических свойств и др. Эксплуатационные параметры качества определяют важнейшие свойства соединений в процессе нормальной эксплуатации, такие как интенсивность изнашивания, контактную жесткость в динамике при флуктуациях нагрузки и др. [1, 2].

В настоящее время в технологиях антифрикционной обработки могут применяться различные методы модификации поверхностей деталей: использование твердых износостойких покрытий (например, нитридов титана TiN, молибдена MoN и других покрытий), нанесение мягких медесодержащих прирабочных пленок и др. Последующая обработка модифицированных поверхностей методами

поверхностно-пластического деформирования (ППД) позволяет сформировать требуемые параметры качества поверхности.

В статье представлены результаты исследований, позволившие получить модели для количественной оценки влияния факторов обработки поверхностей деталей с применением антифрикционных технологий и дальнейшей их приработки в парах трения скольжения на формирование эксплуатационных параметров шероховатости, которые, в свою очередь, оказывают значительное влияние на эксплуатационные свойства трибоэлементов.

Методология исследований

Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения исследовалось для двух вариантов комбинированной антифрикционной обработки (КАФО) деталей:

– КАФО на основе нанесения твердых износостойких нитридсодержащих покрытий на поверхности деталей [4];

– КАФО на основе нанесения мягких медесодержащих прирабочных пленок на

рабочие поверхности деталей (охватываемых трибоэлементов) [5].

Оба варианта способствуют повышению износостойкости соединений трения скольжения, снижению пути и времени приработки

трибоэлементов, коэффициента трения, величины начального износа и др.

Логическую модель технологической системы (ТС) КАФО можно представить в следующем виде:

$$TC = (O_{11} \vee O_{12} \vee \dots \vee O_{1n}) \wedge (O_{21} \vee O_{22} \vee \dots \vee O_{2n}) \wedge (O_{m1} \vee O_{m2} \vee \dots \vee O_{mn}). \quad (1)$$

Предполагается, что в общем случае ТС может иметь m технологических операций O , каждая из которых может быть реализована n способами обработки.

Технология КАФО может включать три основных этапа обработки деталей.

На первом этапе осуществляется предварительная чистовая обработка поверхности. Технологические операции могут выполняться чистовым точением (O_{11}) инструментом с поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами или шлифованием (O_{12}). Предпочтительнее применение лезвийных методов обработки, при которых исключается процесс шаржирования поверхности. Также могут дополнительно применяться методы ППД.

На втором этапе осуществляется модификация поверхностей деталей нанесением твердых (O_{21}) или мягких прирабочных покрытий (O_{22}).

Третий этап КАФО связан с формированием требуемых параметров микропрофиля поверхности детали. Обработка осуществляется такими методами ППД, как алмазное выглаживание (АВ) (O_{31}), накатывание шариками (O_{32}) и др. [5, 6].

Каждый этап обработки преследует свои цели. На первом этапе обеспечивается заданная точность размеров детали и требуемые геометрические параметры качества поверхности для эффективного нанесения покрытий. Например, мягкие прирабочные пленки наносятся фрикционным способом, то шероховатость поверхности должна инициировать процесс микрорезания. На третьем этапе формируется микропрофиль поверхности, исключая процесс микрорезания и обеспечивающий требуемые параметры эксплуатационных свойств, в частности износостойкость [5, 7].

Технологический процесс антифрикционной обработки на основе нанесения твердых

покрытий включает в себя следующие операции:

1. Предварительная обработка поверхности вала для обеспечения точности сопряжения поверхностей в узлах типа подшипников скольжения. Управляющий фактор X_1 предполагает точение эльбором или круглое шлифование.

2. Алмазное выглаживание для подготовки поверхности под нанесение твердых нитридсодержащих покрытий. Управляющий фактор X_2 – сила выглаживания Q_1 , значения которой варьируются от 100 Н до 400 Н. Радиус индентора инструмента – $r = 3,0$ мм.

3. Нанесение твёрдого покрытия методом катодно-ионной бомбардировки в вакууме по известной технологии. Управляющий фактор X_3 – вид покрытия M_1 : TiN или MoN.

4. Алмазное выглаживание поверхности для формирования заданных триботехнических характеристик. Управляющий фактор X_4 – сила выглаживания Q_2 , значения которой варьируются от 50 Н до 150 Н. Радиус индентора инструмента – $r = 3,0$ мм.

Для исследований образцы валов изготавливались из стали 45, закаленной до HRC 48...50.

Анализ параметров микропрофиля поверхности детали после четвертой операции показал, что его высотные характеристики после АВ уменьшились примерно в 10 раз, радиус закругления вершин увеличился более чем в 25 раз, а отношение $R_{max}/\bar{r} \approx 7 \cdot 10^{-4}$, что должно способствовать пластическому оттеснению материала сопряжённого контртела при трении. Особо необходимо отметить снижение примерно в 10^4 раз величины безразмерного комплекса Крагельского-Комбалова Δ , что указывает на возросшие триботехнические свойства поверхности.

Приработка соединений осуществлялась на специальной машине трения, которая

позволяла моделировать нагрузки от статической до динамических, изменяющихся по периодическому закону с заданными параметрами.

Триботехнические испытания соединений проводились на программируемом стенде (машина трения) который позволял моделировать изменение нагрузок от статических до динамических, изменяющихся по периодическому закону с заданными параметрами [3]. В качестве управляющих факторов рассматривались скорость $v_{пр}$ относительного скольжения поверхности трибоэлементов в процессе приработки, величина номинальной погонной нагрузки $P_{пр}$ на трибосопряжение в процессе приработки, процент вариаций ΔP номинальной погонной нагрузки на трибосоединение в процессе приработки при моделировании динамических условий эксплуатации и материал вкладыша M_i [4, 5, 7, 8].

Процесс формирования параметров эксплуатационной шероховатости пар трения скольжения в динамике рассматривался с точки зрения влияния как технологических факторов КАФО ($X_1 - X_4$), так и факторов приработки соединения ($X_5 - X_9$): X_5 – материал M_2 мягкого покрытия вкладыша, получаемого гальваническим способом (медь или олово + висмут); X_6 – погонная нагрузка $P_{пр}$ на соединение при изнашивании ($P_{пр \min} = 40$ Н/мм; $P_{пр \max} = 60$ Н/мм); X_7 – скорость $v_{пр}$ относительного скольжения трибоэлементов ($v_{пр \min} = 10$ м/мин; $v_{пр \max} = 60$ м/мин); X_8 – величина изменения ΔP номинальной погонной нагрузки ($\Delta P_{\min} = 15$ %; $\Delta P_{\max} = 25$ %); X_9 – смазка, используемая при стендовых испытаниях (ИС 20 или МГ-10).

Коэффициенты и параметры моделей

формирования параметров шероховатости в ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий определялись путем обработки результатов активных экспериментов, выполненных по планам в виде дробных реплик типа 2^{9-5} [5].

При исследовании формирования эксплуатационной шероховатости в процессе приработки поверхностей трибоэлементов, полученных в ТС КАФО на основе нанесения мягких медесодержащих прирабочных плёнок рассматривалось двенадцать управляющих факторов: скорость v_T резания; подача инструмента S_T и глубина t резания при точении стали 45 композитом 10; жёсткость j ТС; $M_{п}$ – материал мягкой прирабочной пленки на поверхности вала (получена фрикционным латунированием или химическим меднением); сила Q_{AB} алмазного выравнивания, продольная подача S_{AB} при АВ, скорость выравнивания v_{AB} ; материал $M_{вкл}$ вкладыша (бронза ОЦС 5-5-5 или антифрикционный чугун АЧС1), скорость $v_{пр}$ относительного скольжения поверхностей трибоэлементов в процессе приработки; величина номинальной погонной нагрузки $P_{пр}$ на трибосопряжение в процессе приработки; процент вариаций ΔP номинальной погонной нагрузки на трибосоединение в процессе приработки [5, 7].

Факторная область эксперимента по исследованию формирования параметров шероховатости в ТС КАФО на основе применения медесодержащих прирабочных плёнок представлена в табл. 1, а сами исследования проводились методом активного эксперимента путем реализации регулярной дробной реплики типа 2^{12-8} от полного факторного эксперимента.

1. Исследуемая область факторного пространства

1. The studied area of the factor space

Код фактора	Факторы											
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
	v_T	S_T	t	j	$M_{п}$	Q_{AB}	S_{AB}	v_{AB}	$M_{вкл}$	$v_{пр}$	$P_{пр}$	ΔP
–	65	0,05	0,10	2,50	1,5	100	0,075	65	2,0	10	30	0,15
+	200	0,15	0,25	1,62	3,0	300	0,150	100	5,0	50	50	0,25

Результаты

В результате обработки экспериментальных данных по известной методике [5, 10, 11], получены адекватные модели формирования параметров эксплуатационной шероховатости. Для ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий модели имеют вид:

$$Y_i = b_0 k_1 k_2 k_3 k_4 Q_1^{b_1} Q_2^{b_2} P_{\text{пр}}^{b_3} v_{\text{пр}}^{b_4} (\Delta P)^{b_5}, \quad (2)$$

$$Y_i = b_0 K_1 K_2 v_T^{b_1} S_T^{b_2} t^{b_3} j^{b_4} Q_{\text{AB}}^{b_6} S_{\text{AB}}^{b_7} v_{\text{AB}}^{b_8} v_{\text{пр}}^{b_{10}} P_{\text{пр}}^{b_{11}} \Delta P^{b_{12}}, \quad (3)$$

где Y_i – i -й параметр эксплуатационной шероховатости; K_1, K_2 – коэффициенты, учитывающие вид приработочной плёнки и материал вкладыша (рассчитываются возведением их кодированных значений в соответствующую

где: Y_i – i -й параметр эксплуатационной шероховатости; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты влияния вида предварительной обработки, материала покрытия вала, материала покрытия вкладыша и вида смазки соответственно; b_0, b_i – параметры модели.

Для ТС КАФО на основе применения мягких медесодержащих приработочных покрытий модели формирования параметров эксплуатационной шероховатости имеют вид:

степень (b_5 и b_9)); b_0, b_i – коэффициенты модели.

Например, модель формирования параметра Ra , мкм, имеет вид:

$$Ra = 8,82 \cdot 10^{-6} K_1 K_2 \frac{v_T^{0,71} \left(\frac{\Delta P}{P_{\text{пр}}} \right)^2}{S_T^{0,07} t^{0,17} j^{0,15} Q_{\text{AB}}^{0,23} S_{\text{AB}}^{0,22} v_{\text{AB}}^{2,58} v_{\text{пр}}^{0,3} P_{\text{пр}}^{0,72}} [\text{мкм}].$$

Эволюцию технологического профиля шероховатости поверхностей в эксплуатационный можно проследить на примере поверхности вала пары трения, поверхности образцов которых обрабатывались в ТС КАФО на основе применения мягких медесодержащих приработочных покрытий. Значения факторов $X_2, X_4, X_5, X_7, X_{10}, X_{12}$ для рассматриваемого случая приняты максимальными, а остальных факторов – минимальными (табл. 1).

После чистового точения на поверхность образца фрикционным латунированием наносилась мягкая приработочная плёнка, а затем осуществлялось алмазное выглаживание поверхности. Затем в сборе со вкладышем из чугуна АЧС1 осуществлялась приработка в соответствии с планом эксперимента. По завершению процесса приработки на функциональных поверхностях обоих трибоземленов сформировался эксплуатационный микропрофиль, фрагменты которого, а также параметры шероховатости и фрагменты топографии поверхности вала показаны на рис. 1.

Измерение параметров шероховатости осуществлялась, с использованием компьютеризированных систем металлографического анализа и исследования микропрофиля поверхностей [5, 10, 11]. Профилограммы сняты в одном масштабе. Обращает на себя внимание пригнannость поверхностей друг к другу, то есть имеет место действительный факт их

приработки.

Динамику эволюции поверхности вала можно проследить по отдельным параметрам от чистового точения до завершения процесса приработки (рис. 1).

Так, например, параметр $\Delta = 0,79$ после чистового точения, а в процессе последующих фрикционного латунирования и алмазного выглаживания уменьшается до 0,022, т. е. в 35,08 раза. Величина Δ при своём уменьшении способствует увеличению износостойкости. По окончании процесса приработки эта величина претерпевает дальнейшее уменьшение до 0,01, т. е. становится в 2,2 раза меньше технологического значения.

Сравнение микрофотографий поверхности вала, представленных на рис. 1, показывает, что в процессе приработки мягкая приработочная плёнка не ликвидируется, а сама поверхность теряет эффект сглаживания вершин профиля (рис. 1, б) и носит на себе следы микроцарапания, которое происходит либо посредством контактирующей поверхности вкладыша, либо посредством частиц продуктов изнашивания.

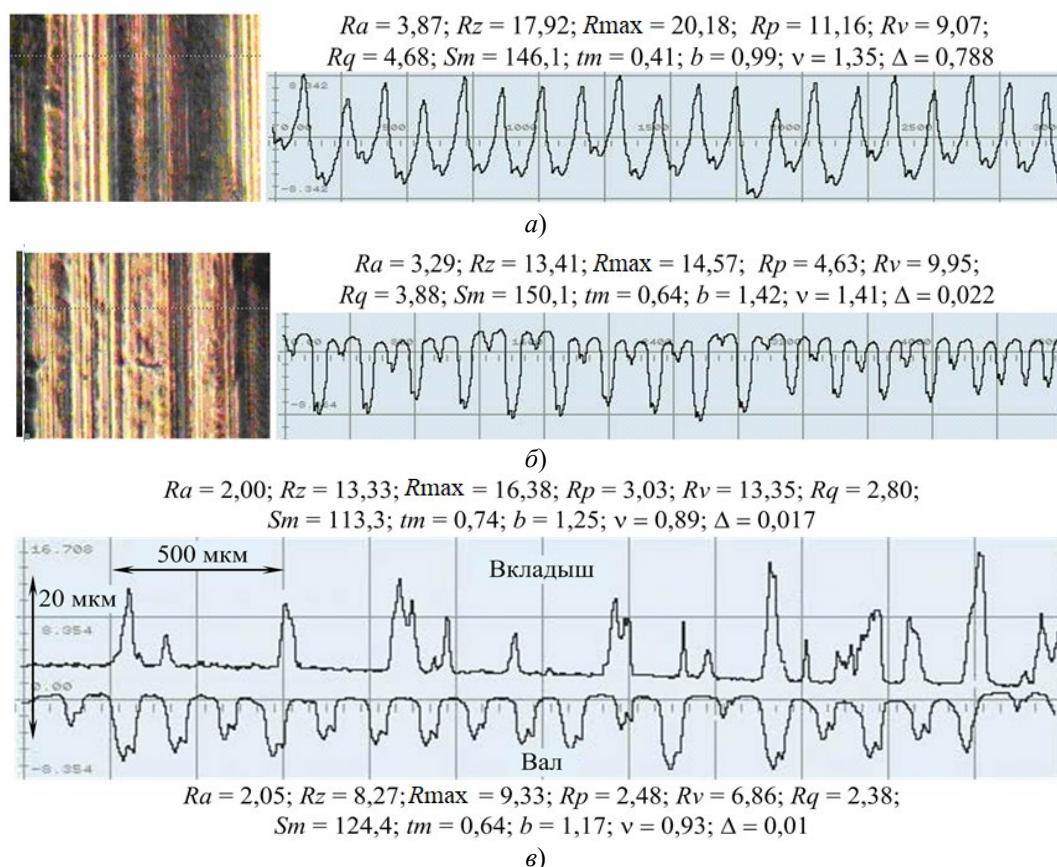


Рис. 1. Эволюция микропрофиля поверхностей образцов в процессе отдельных этапов жизненного цикла:

а – предварительное точение; б – последующее нанесение мягкой плёнки и алмазное выглаживание; в – окончание процесса приработки

Fig. 1. The evolution of the microprofile of the sample surfaces during individual stages of the life cycle:

a – preliminary turning; b – subsequent application of a soft film and diamond burnishing; c – the end of the break in process

Вид эксплуатационной шероховатости поверхности вкладыша отличается от исходной, которая имела следующие параметры: $Ra = 1,52$ мкм; $Rz = 7,8$ мкм; $R_{max} = 8,9$ мкм; $Rp = 3,2$; $Sm = 105$ мкм; $b = 0,91$; $v = 1,95$; $\Delta = 0,6$. Сравнивая эти параметры с параметрами, представленными на рис. 2, в, следует отметить, что микропрофиль поверхности вкладыша претерпел значительные изменения. Высотные параметры Ra , Rz , R_{max} увеличились, причём параметр R_{max} увеличился почти в 2,0 раза, однако параметр Ra практически не изменился. Это говорит о том, что резко возросла несущая способность поверхности. Об этом свидетельствует сравнение величин b и v технологической и эксплуатационной шероховатости. Величина Δ для поверхности вкладыша уменьшилась в 3,3 раза, что также

указывает на повышение триботехнических характеристик эксплуатационного профиля по сравнению с технологическим.

Представленный пример показывает, что в процессе приработки высотные параметры шероховатости не всегда должны уменьшаться. Они могут и увеличиваться. Это может благоприятно сказываться и на повышении износостойкости пары в целом, т. к. при этом создаются дополнительные микрообъёмы, которые могут служить как своеобразными «хранилищами» смазки, так и «приёмниками» продуктов изнашивания.

Интервалы варьирования параметров эксплуатационной шероховатости образцов в исследуемой области факторного пространства ТС КАФО для различных видов КАФО представлены в табл. 2 и табл. 3.

2. Интервалы варьирования параметров эксплуатационной шероховатости на основе применения твёрдых покрытий

2. Intervals of variation of operational roughness parameters based on the use of hard coatings

Вал				
Ra , мкм	R_{max} , мкм	Rp , мкм	ρ_m , мкм	Δ
0,53...0,12	5,78...1,3	4,25... 0,75	125... 13,0	0,45... 0,03
Вкладыш				
Ra , мкм	R_{max} , мкм	Rp , мкм	ρ_m , мкм	Δ
1,0...0,2	10,0...2,5	8,3...1,9	180...15	0,5... 0,07

3. Интервалы варьирования параметров эксплуатационной шероховатости на основе применения медесодержащих пленок

3. Intervals of variation of operational roughness parameters based on the use of copper-containing films

Вал					
Ra , мкм	R_{max} , мкм	Rp , мкм	ρ_m , мм	b	v
0,56...12,2	2,9...47,0	0,66...13,4	0,1...4,8	0,76...2,0	0,8...1,6
Вкладыш					
Ra , мкм	R_{max} , мкм	Rp , мкм	ρ_m , мм	b	v
0,02... 11,5	0,12...58,0	0,06...15,2	0,19... 17,6	0,48... 1,34	0,8...2,35

С целью оценки степени влияния факторов КАФО на формирование эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей осуществлялось их ранжирование методом Парето.

Анализ диаграмм Парето (рис. 2) показывает, например, что на эксплуатационный параметр Ra шероховатости поверхности вала, полученной после обработки в ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий, превалирующее влияние оказывает сила алмазного выглаживания перед нанесением покрытия (30,6 %) (см. рис. 2, а), а на соответствующий параметр вкладыша (см. рис. 2, б) наибольшее влияние оказывает метод предварительной обработки, причём предварительная обработка круглым шлифованием способствует уменьшению данного показателя примерно на 26 %. Аналогично можно проанализировать влияние рассматриваемых факторов на все остальные параметры. Диаграммы Парето позволяют провести ABC – анализ влияния исследуемых факторов на формирование эксплуатационных параметров шероховатости. В группу А входят факторы обработки, определяющие до 75 % изменчивости рассматриваемого параметра, а в группы В и С – соответственно от 75 % до 95 % и от 95 % до 100 %, что позволяет наиболее эффективно управлять процессом обработки и приработки по тем или иным критериям.

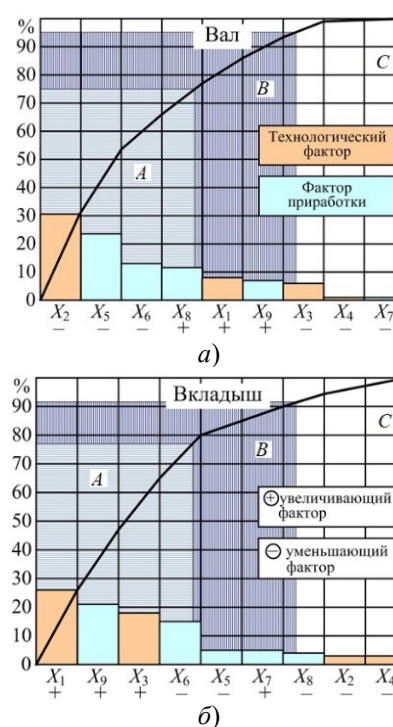


Рис. 2. Диаграммы Парето влияния на формирование параметра Ra эксплуатационной шероховатости управляющих факторов в ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий:

а – для поверхности вала; б – для поверхности вкладыша

Fig. 2. Pareto diagrams of the influence on the generation of operational roughness parameter Ra for control factors in the TS KAFO based on the use of hard coatings:

а – for the surface of the shaft; б – for the surface of the bushing

Возникает вопрос о степени согласованности влияния исследуемых факторов на формирование рассматриваемых параметров, в данном случае – параметров эксплуатационной шероховатости. Оптимально, когда она составляет 100 %, но это, в силу сложности процессов, происходящих при обработке деталей и приработке пар трения скольжения практически неосуществимо. Оценить степень согласованности предлагается с помощью коэффициента ранговой конкордации W , при этом, исследуемые параметры выступают как бы в роли «независимых экспертов», которые ранжируют факторы обработки (рис. 2):

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (4)$$

где m – число параметров; n – число факторов; S – сумма квадратов отклонений.

Использовать коэффициент конкордации можно после оценки его значимости, которая возможна с помощью специальных таблиц или известных статистических распределений. Например, величина $m(n-1)W$ имеет χ^2 -распределение с числом степеней свободы $f = n - 1$. Значение χ^2 -критерия определяют по зависимости:

$$\chi^2 = \frac{12S}{mn(n+1)}. \quad (5)$$

Гипотеза о наличии согласия «экспертов» может быть принята, если при заданном числе степеней свободы табличное значение χ^2 меньше расчётного для 5,0 %-ного уровня значимости.

Оценив согласованность мнений всех «экспертов», строится средняя диаграмма рангов, откладывая по одной оси факторы, а по другой – соответствующие суммы рангов (рис. 3). Чем меньше сумма рангов данного фактора, тем выше его место на диаграмме. С помощью суммы рангов оценивается значимость факторов.

Анализ процессов формирования эксплуатационных параметров шероховатости показал:

– на параметры Ra ; Rp ; ρ ; Δ шероховатости вала 39 % влияния оказывают технологические факторы обработки в ТС КАФО, а 61 % – факторы приработки ($W = 0,52$ и $\chi^2_{\text{расч}} = 16,7$);

– для параметров эксплуатационной шероховатости вкладышей эти показатели составляют соответственно 42 % и 58 % при $W = 0,53$ и $\chi^2_{\text{расч}} = 17$.

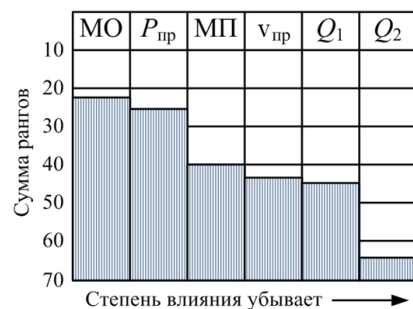


Рис. 3. Диаграмма ранжирования управляющих факторов в ТС КАФО на основе применения твёрдых покрытий по степени влияния на параметры эксплуатационной шероховатости:

МО – метод предварительной обработки; $P_{\text{пр}}$ – величина номинальной погонной нагрузки на трибосопряжение в процессе приработки; МП – материал покрытия поверхности детали; $v_{\text{пр}}$ – скорость относительного скольжения в процессе приработки; Q_1 , Q_2 – силы выглаживания

Fig. 3. Ranking diagram of the control factors in the TS KAFO based on the use of hard coatings according to the degree of influence on the parameters of operational roughness:

МО – roughing operation technique; P_{pr} – the value of the nominal linear load on the tribounit during breakingin; MP – the material of the part surface coating; v_{pr} – speed of slippage in the process of breakingin; Q_1 , Q_2 – burnishing forces

Результаты анализа диаграмм Парето показывают, что в исследуемой триботехнологической системе технологические факторы обработки в ТС КАФО оказывают влияние на формирование параметров шероховатости в среднем на 47,3 %, а факторы приработки – на 52,7 %.

Аналогичные результаты получены и для триботехнологической системы после обработки деталей в ТС КАФО на основе нанесения медесодержащих приработочных пленок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Инженерия** поверхности деталей / А. Г. Суслов, В. Ф. Безязычный, Ю. В. Панфилов [и др.]; под редакцией А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
2. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 447 с.
3. **Горленко О.А., Шохийн А.Н., Щербаков А.Н.** Технологические методы продления долговечности цилиндрических поверхностей трения // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 2 (140) С. 40–48. doi:10.30987/2223-4608-2023-2-40-48.
4. **Моргаленко Т.А.** Технология обработки поверхностей трения скольжения, основанная на применении твердых износостойких покрытий с учетом влияния технологической наследственности // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 12 С. 31–38. doi:10.30987/2223-4608-2020-12-31-38.

5. **Нагоркин М. Н.** Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов: монография / под ред. А. В. Киричека. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. 304 с.

6. **Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Kovalyova E.V.** Modeling of process of forming quality parameters for surfaces of parts by diamond burnishing taking into account technological heredity. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 327, 042071 (2018).

7. **Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Nagorkina V.V.** Simulation modelling of tribotechnologies system and its parametric reliability assessment on tribotechnical parameters of the joints of sliding friction. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 177, 012079 (2017).

8. **Федоров В. П., Суслов А. Г., Нагоркин М. Н.** Диагностика технологических систем по надёжности обеспечения заданных параметров качества обрабатываемых поверхностей деталей // Научно-технические технологии в машиностроении. 2020. № 1 (103). С. 15–24. doi:10.30987/2223-4608-2020-1-15-24.

9. **Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Л.** Основы математического моделирования технических систем. М.: Флинта, 2021. 271 с.

10. **Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Вайнер Л.Г.** Методологические основы диагностики технологических систем металлообработки по параметрической надёжности 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.

11. **Суслов А.Г., Федоров В.П., Нагоркин М.Н., Пыриков И.Л.** Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин // Научно-технические технологии в машиностроении. 2018. № 10. С. 3–13. doi:10.30987/article 5bb4b1f9abbc54.46761484.

REFERENCES

1. Engineering of parts surface / A. G. Suslov, V. F. Bez'yazichniy, Yu. V. Panfilov [et al.]; edited by A. G. Suslov. Moscow: Mashinostroyeniye, 2008. 320 p.

2. Technological support and operation properties increase of parts and their joints/ A.G. Suslov, V.P. Fedorov, O.A. Gorlenko

[et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroyeniye, 2006. 447 p.

3. Gorlenko O.A., Shokhin A.N., Shcherbakov A.N. Technological methods for durability extending of cylindrical friction surfaces // Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2023, No. 2 (140) pp. 40–48. doi:10.30987/2223-4608-2023-2-40-48

4. Morgalenko T.A. Technology of sliding friction surface machining based on hard wear-resistant coating use taking into account technological inheritance impact / Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2020, No. 12 pp. 31–38. doi:10.30987/2223-4608-2020-12-31-38.

5. Nagorkin M.N. Parametric reliability of machinery surface finishing and strengthening with super-hard synthetic tools: monograph / M.N. Nagorkin; under the editorship of A.V. Kirichek. Moscow: Spectrum, 2017, 304p.

6. Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Kovalyova E.V. Modeling of process of forming quality parameters for surfaces of parts by diamond burnishing taking into account technological heredity. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 327, 042071 (2018).

7. Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Nagorkina V.V. Simulation modelling of tribotechnologies system and its parametric reliability assessment on tribotechnical parameters of the joints of sliding friction. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 177, 012079 (2017).

8.8. Fedorov V. P., Suslov A. G., Nagorkin M. N. Diagnostics of technological systems according to parametric reliability of ensuring a given quality of the treated surfaces/ Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2020, No. 1 (103), pp. 15–24. doi:10.30987/2223-4608-2020-1-15-24.

9. Averchenkov V.I., Fedorov V.P., Heifets M.L. Fundamentals of mathematical modeling of technical systems. Moscow: Flint, 2021, 271 p.

10. Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Weiner L.G. Methodological foundations of diagnostics of technological metalworking systems based on parametric reliability of ensuring a given quality of the 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.

11. Suslov A.G., Fedorov V.P., Nagorkin M.N., Pyrikov I.L. Complex approach to experimental investigations of metalworking technological systems to ensure parameters of quality and operation properties of machinery surfaces/Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2018, No. 10, pp. 3–13. doi:10.30987/article 5bb4b1f9abbc54.46761484

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 05.09.2023; одобрена после рецензирования 21.09.2023; принята к публикации 08.11.2023.

The article was submitted 05.09.2023; approved after reviewing 21.09.2023; assepted for publication 08.11.2023.

Указатель статей за 2023 г

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

- Панов А.Г., Шаехова И.Ф., Гуртовой Д.А.** О теплопроводности высокопрочных чугунов с шаровидным и вермикулярным графитом при изотермической закалке №1(139)-2023 г
- Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х.** Расчет кинетической модели разрушения адгезионного соединения порошкового покрытия и металлического субстрата №1(139)-2023 г
- Валяева М.Е., Кондратьева Л.А.** Получение силана в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из кремнийсодержащего сырья с использованием азидата натрия и галогенидов алюминия №2(140)-2023 г
- Кондратьева А.** Исследование возможности синтеза композиции «нитрид титана – силицид титана» по азидной технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза №4(142)-2023 г
- Шерина Ю.В., Луц А.Р., Кичаев П.Е., Богатов М.В., Амосов А.П.** Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана и последующей термической обработки на структуру и свойства сплава АМг6 №5(143)-2023 г
- Соловьев М.Е., Раухваргер А.Б., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х., Мищенко В.И.** Влияние режимов плазменного напыления порошка оксида алюминия на пористость и электрическое сопротивление покрытия №5(143)-2023 г
- Петрова Л.Г.** Научноёмкие технологии в материаловедении: высокотемпературное сквозное азотирование жаростойкой стали №9(147)-2023 г
- Кокарев С.С., Соловьев М.Е., Балдаев С.Л., Балдаев Л.Х.** Восстановление пространственной функции распределения неоднородностей покрытия по функции распределения на шлифе №11(149)-2023 г
- Абдулманова Р.Р., Тюсенков А.С., Бугай Д.Е.** О преимуществах применения стали 10Х23Н18 вместо сплава Никель 201 для изготовления труб, стойких в растворах гидроксида натрия №12(150)-2023 г

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

- Чудин В.Н.** Технологические режимы раздачи и обжима при локальном нагреве №7(145)-2023 г
- Ларин С.Н., Бессмертная Ю.В.** Изотермическая высадка титановых прутковых заготовок пуансоном с косою рабочей поверхностью №10(148)-2023 г
- Дёмин В.А.** Интенсификация горячей листовой штамповки днищ №12(150)-2023 г

СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Овчинников В.В., Акопян Т.К., Проценко Е.О., Поляков Д.А.** Показатели свариваемости при сварке плавлением перспективных алюминиевых сплавов на основе системы Al–Ca–Zn–Mg №4(142)-2023 г
- Албагачиев А.Ю.** Физико-механическое моделирование сварки трением с перемешиванием №4(142)-2023 г
- Овчинников В.В., Резцов Р.Б.** Особенности формирования сварных соединений алюминиевого сплава АК9, полученного селективным лазерным плавлением №10(148)-2023 г

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА

- Петрова Л.Г., Александров В.Д., Морщилов М.В.** Формирование гетерофазной структуры зон лазерного легирования в алюминиевых сплавах для повышения антифрикционных свойств поверхности №4(142)-2023 г
- Злобин Е.П., Хаймович А.И., Гончаров Е.С., Балякин А.В.** Влияние технологических параметров вибрационной обработки на качество изделий, изготовленных по технологии селективного лазерного сплавления №6(144)-2023 г
- Григорьянц А.Г.** Моделирование процесса селективного лазерного плавления в аддитивном производстве №10(148)-2023 г
- Яцко Д.С.** Аддитивные технологии для создания магнитных материалов №11(149)-2023 г
- Нигметзянов Р.И., Приходько В.М., Сундуков С.К., Клименко В.А., Кольдюшов В.К.** Применение ультразвука в процессе аддитивного производства пластиковых деталей №12(150)-2023 г

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

- Барабанова И.А.** Анализ распределения нагрузки по виткам в резьбовых соединениях и способов обеспечения ее равномерности №1(139)-2023 г
- Сайкин С.А., Цветков Е.В., Толкачев А.В.** Измерение силы резания и крутящего момента при резьбофрезеровании №1(139)-2023 г
- Зайдес С.А., Хо М.К.** Оценка величины упругой разгрузки при маятниковом поверхностном пластическом деформировании №2(140)-2023 г
- Чуприков А.О., Ямников А.С.** Методология проектирования токарных операций для обработки оболочечных корпусов №3(141)-2023 г

Зайдес С.А., Нгуен Х.Х. Влияние реверсивного поверхностного пластического деформирования на параметры волнистости цилиндрических деталей	№4(142)-2023 г
Базров Б.М. Определение потребностей в технологическом оснащении производства деталей	№5(143)-2023 г
Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ковалев Ю.В. Особенности проектирования инструмента для физического моделирования процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес	№5(143)-2023 г
Богомолов М.Н., Ямников А.С., Ямникова О.А. Осевая сила при резании сферической фрезой	№6(144)-2023 г
Бочкарев П.Ю. Развитие технологического обеспечения методов обработки с использованием несвязанного абразива	№7(145)-2023 г
Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Николаев А.Ю., Тимофеев С.А. Исследование отклонений формы изделий из быстрорежущей стали при точении фрезерованием на станках с ЧПУ	№7(145)-2023 г
Киселев Е.С., Илюшкин М.В. Компьютерное моделирование процесса сверления сложных пакетов титанового сплава и композиционного материала с использованием цифровых двойников	№8(146)-2023 г
Хейфец М. Л. Проектирование мехатронных систем гибридных станочных комплексов	№8(146)-2023 г
Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э. Проектирование технологии обработки в гранулированных средах в условиях цифрового производства	№9(147)-2023 г
Братан С.М., Головин В.И., Новоселов Ю.К., Дымченко И.А. Расчет высокопроизводительных циклов шлифования валков холодной прокатки на основе оптимизации цикла по радиальному усилию	№10(148)-2023 г
Базров Б.М. Организация мелкосерийного производства деталей на принципах модульной технологии	№11(149)-2023 г
Тотай А.В., Нагоркин М.Н., Селифанов В.С. Многокритериальная оптимизация операционных режимов технологических процессов	№11(149)-2023 г
Унянин А.Н., Финагеев П.Р. Исследование эффективности методики коррекции режима процесса механической обработки с изменяющимися во времени параметрами в условиях неопределенности технологической информации	№12(150)-2023 г

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Яковлева А.П., Албагачиев А.Ю., Кулаков О.И. Повышение износостойкости цилиндрических пар трения методом комбинированной обработки	№1(139)-2023 г
Албагачиев А.Ю., Яковлева А.П. Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в научноёмких технологиях	№3(141)-2023 г
Суслов А.Г., Съянов С.Ю. Одноступенчатое технологическое обеспечение износостойкости деталей машин электроэрозионной обработкой	№3(141)-2023 г
Лебедев В.А., Тороп Ю.А., Кочетов А.Н., Коваль Н.С. Оценка влияния ультразвуковых колебаний на напряженное состояние поверхностного слоя отверстия, обработанного методом калибрования	№5(143)-2023 г
Макаров В.Ф., Песин М.В., Волков М.В. Повышение эффективности прорезки глубоких елочных пазов в дисках газовых турбин из жаропрочных сплавов путем применения комбинированного метода гидроабразивной обработки и протягивания	№6(144)-2023 г
Петрова Л.Г., Сергеева А.С., Вдовин В.М. Модифицирование поверхности быстрорежущего инструмента совместным насыщением вольфрамом и азотом	№7(145)-2023 г
Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Автоматизация и цифровизация ультразвуковых технологических процессов	№8(146)-2023 г
Смоленцев Е.В., Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В. Комбинированные технологии повышения надежности и ресурса изделий авиакосмической техники	№8(146)-2023 г

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Волковский А.А., Макаров В.Ф. Сравнительный анализ качества обработанной поверхности при прерывистом и традиционном шлифовании полимерных композиционных материалов на основе углеволокна	№2(140)-2023 г
Унянин А.Н., Димухаметов И.З. Моделирование технологических параметров процесса фрезерования заготовок деталей из поликарбоната при различных режимах обработки	№2(140)-2023 г
Макаров В.Ф., Песин М.В., Волковский А. А. Инновационные технологии повышения производительности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов	№9(147)-2023 г

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СБОРКЕ МАШИН

Сундуков С.К. Применение ультразвуковых технологий при получении прессовых соединений	№5(143)-2023 г
Варганов М.В., Линь Н.В. Научноёмкие технологии в сборочном производстве	№10(148)-2023 г

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

- Губанова А.А. Взаимосвязь траектории формообразующих движений с рельефом поверхности при фрезеровании №1(139)-2023 г
- Рамазанов Г.Х. Износ инструмента дорожной фрезы и модели эффективности резания №1(139)-2023 г
- Бреки А.Д. Обобщённый закон внешнего трения скольжения твёрдых тел №2(140)-2023 г
- Куксёнова Л.И., Алексеева М.С., Козлов Д.А. Зависимость показателей эксплуатационных свойств азотированных сталей от структурного состояния поверхностного слоя №3(141)-2023 г
- Бреки А.Д. Эмпирический закон кинетики изменения силы трения скольжения при самопроизвольных изменениях состояния фрикционного контакта №3(141)-2023 г
- Тихомиров В.П., Шалыгин М.Г., Измеров М.А. Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения №6(144)-2023 г
- Иванов С.В., Антошин В.А., Мельников Д.А., Албагачиев А.Ю. Абразивная износостойкость и ресурс эксплуатации труб из стеклокомпозита №6(144)-2023 г
- Бреки А.Д. Аналитическое представление зависимостей силы трения от температуры при фрикционном взаимодействии пространственно структурированных каучуков со стальной поверхностью №7(145)-2023 г
- Бычковский В.С. Условия и режимы обработки технологического процесса маслonaполнения полимерных деталей №11(149)-2023 г

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ДЕТАЛЕЙ МАШИН И ИХ СОЕДИНЕНИЙ**

- Безязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Технологическое обеспечение изготовления зубчатых колес авиационных газотурбинных двигателей с учетом нестабильности физико-механических свойств их материалов №8(146)-2023 г
- Базров Б.М. Специализация машиностроительного производства №8(146)-2023 г
- Чигиринский Ю.Л., Ингеманссон А.Р. Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства №9(147)-2023 г
- Бочкарев П.Ю., Решетникова Е.П. Повышение качества технологической подготовки механообработывающих производств на основе расширенного анализа конструктивных характеристик деталей №12(150)-2023 г
- Нагоркин М.Н., Федоров В.Н., Суслов А.Г., Тотай А.В. Технологическое управление параметрами эксплуатационной шероховатости поверхностей деталей пар трения скольжения комбинированной антифрикционной обработкой №12(150)-2023 г

**НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕМОНТЕ, ВОССТАНОВЛЕНИИ
ДЕТАЛЕЙ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ**

- Горленко А.О., Шохийн А.Н., Щербаков А.Н. Технологические методы продления долговечности цилиндрических поверхностей поверхностей трения №2(140)-2023 г
- Пряхин Е. И., Трошина Е. Ю. Сравнительный анализ качества маркировки полимерной и кремнийорганической пленки при обработке волоконным наносекундным лазером №7(145)-2023 г

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 17.12.2023. Выход в свет 27.12.2023.

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+