

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## **ВІСНИК**

### **НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

*Серія: Технології в машинобудуванні*

№ 33 (1205) 2016

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 33 (1205). – 166 с.

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Мова статей – українська, російська, англійська.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого наказом МОН України від 21.12.2015 № 1328 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року»*

**Координаційна рада:**

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А. В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

А. І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В. Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.;

В. В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;

П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;

С. І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; М. А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.;

В. І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г. В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.;

О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В. І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.;

П. Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В. А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.;

М. І. РИЩЕНКО, д-р техн. наук, проф.; **Ю. В. Самородов**, д-р техн. наук, проф.;

Г. М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; **Ю. В. Тимофієв**, д-р техн. наук, проф..

**Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** **Ю. В. Тимофієв**, д-р техн. наук, проф.

**Заст. відповідального редактора:** О. О. Ключко, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** Є. В. Басова, канд. техн. наук, доц.

**Члени редколегії:** С. С. Добротворський, д-р техн. наук, проф.; О. А. Мельніченко, д-р техн. наук, проф.; **О. Я. Мовшович**, д-р техн. наук, проф.; О. А. Пермяков, д-р техн. наук, проф.;

Ю. А. Сизий, д-р техн. наук, проф.; Д. В. Сталінський, д-р техн. наук.;

М. С. Степанов, д-р техн. наук, проф.; В. А. Фадеєв, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. Хіщан, д-р техн. наук, проф.; О. М. Шелковий, д-р техн. наук, проф.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Технології в машинобудуванні», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**, у жовтні 2016 р – до міжнародної наукометричної бази **Index Copernicus** (режи доступу <http://journals.indexcopernicus.com/+++++++.p24783946,3.html>)*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол №9 від 25«листопада» 2016 р.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY  
«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

**BULLETIN**  
**OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY**  
**«KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE»**

*Series: « Techniques in a machine industry»*

№ 33 (1205) 2016

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkov  
NTU «KhPI»

### State edition

### Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy

KB № 5256 from July 2, 2001

The collection is published in Ukrainian and Russian.

*Bulletin of National Technical University «KhPI» included in the «List of scientific professional editions of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences», approved by order of the (MES of Ukraine) of 21.12. 2015 № 1328 «On approval decisions Certifying Board of the Ministry for academic councils of 28 December 2015»*

### Coordinating Board:

L. L. Tovazhnyansky, Dr. Tech. Sci., Prof. (**chief**);  
K. A. Gorbunov, PhD. Tech. Sci., Docent. (**secretary**);  
A. P. Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ie. I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
Ie. Ie. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. V. Boiko, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
F. F. Hladkyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. D. Hodlevskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
A. I. Hrabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof. V. H. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
V. D. Dmytryienko, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
V. V. Yepifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Iu. I. Zaitsev Dr. Tech. Sci., Prof.;  
P. O. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
S. I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. A. Tkachuk Dr. Tech. Sci., Prof.;  
V. I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; H. V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
O. K. Morachkovskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Nikolaienko, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
P. H. Pererva, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. A. Puliaiev, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
M. I. Ryshchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.;  
H. M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Iu. V. Tymofeev Dr. Tech. Sci., Prof.

### Editorial Board:

**Editor:** Iu. V. Tymofeev, Dr. Tech. Sci., Prof.

**Deputy editor:** A. A. Klochko, Dr. Tech. Sci., Prof.

**Secretary:** Ie. V. Basova, PhD. Tech. Sci., Docent.

**Members of the editorial board:** S.S. Dobrotvorskyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; O.A. Melnichenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.Ia. Movshovych, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.A. Permiakov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Iu.A. Syzyi, Dr. Tech. Sci., Prof.; D.V. Stalinskyi, Dr. Tech. Sci.; M.S. Stepanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.A. Fadieiev, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.D. Khitsan Dr. Tech. Sci., Prof.; A.N. Shelkovyi, Dr. Tech. Sci., Prof.

*In April 2013 Bulletin of National Technical University «KhPI» series «Technologies in mechanical engineering» included in the directory database of periodicals **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**, in October 2016 - the international Scientometrics base Index Copernicus (PU-mode accessibil <http://journals.indexcopernicus.com/+++++++,p24783946,3.html>)*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU «KhPI».  
Protocol No 9 of November 25, 2016

## ПАМ'ЯТИ ПРОФЕССОРА ЮРИЯ ВИКТОРОВИЧА ТИМОФЕЄВА

*От ДГМА кафедра КМСИТ*

Ушел из жизни замечательный человек, Академик высшей школы Украины, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и металлорежущие станки» НТУ «ХПИ» - Ю.В. Тимофеев.

Отечественная наука понесла большую утрату. Научные труды Ю.В. Тимофеева широко известны не только в Украине, но и за рубежом. Основатель научной школы эффективного проектирования, изготовления и эксплуатации агрегатированных технологических систем механообработки, он подготовил для Украины, Китая, Ирака, Нигерии и других стран специалистов высшей квалификации, 11 докторов и 13 кандидатов наук, много лет возглавлял специализированный совет по защите докторских диссертаций, входил в состав экспертного совета ВАК Украины.

Мы запоем его интеллигентным, гостеприимным, эрудированным, доброжелательным, готовым в любой момент помочь, уделить внимание, оказать поддержку, одним словом – Человеком с большой буквы! Он обладал редким даром располагать к себе собеседника, о чем бы ни шел разговор: о станках и технологиях, о диссертациях и методах исследований или о жизненных проблемах.

Его жизнерадостность, отзывчивость, доброта снискали ему заслуженное уважение и благодарность студентов, аспирантов, ученых-технологов всей Украины и за ее рубежом.

*Ему нерукотворным памятником будет  
Любовь, признательность коллег, учеников,  
друзей...*

*И мир технической науки не забудет  
Его трудов всей жизни, мыслей и идей!*

Ректор Донбасской государственной  
Машиностроительной академии В.Д. Ковалев  
Декан факультета экономики и  
менеджмента Е.В. Мироненко  
Зав. кафедрой АПП Г.П. Клименко  
Зав. кафедрой КМСИТ Я.В. Васильченко

*От НТУУ «ХПИ»*

Яркие воспоминания о профессоре с большой буквы Ю.В. Тимофееве связаны со временем нашей совместной работы. Мы работали в экспертном совете ВАК Украины, где рассматривались кандидатские и докторские диссертации. По специфике работы совета в небольшой интервал времени эксперт должен был изложить суть работы, ее достоинства и недостатки. Наверное, Юрий Викторович делал это лучше всех. Проявлялась его колоссальная эрудиция, интеллигентность, понимание сути вопроса и большое уважение к делу, которому он посвятил всю свою жизнь.

Юрий Викторович имел удивительное сочетание благожелательности, уважения к людям и научной принципиальности. Однажды преподаватель кафедры станков ХПИ направил на рецензию Юрию Викторовичу учебное пособие. При встрече со мной Юрий Викторович объяснил ситуацию и сказал просто и понятно: «Я дать положительную рецензию на представленную работу не могу». Этого было достаточно. Комментарии излишни.

У меня осталось яркое впечатление об одной встрече с Юрием Викторовичем. Он приехал из Харькова в Киев рано утром. Было светло и солнечно. В восемь часов утра я встретил Юрия Викторовича возле главного корпуса Киевского политехнического института на центральной аллее, где сейчас находится «Аллея звезд» лучших людей ХПИ. Юрий Викторович как всегда был аккуратно одет. В сочетании с природной интеллигентностью и одухотворенным выражением лица, его облик удивительно гармонизировал с четкими линиями главного корпуса ХПИ. Настоящий профессор в храме науки – таким я навсегда запомнил Юрия Викторовича Тимофеева.

Зав. кафедрой Конструирования станков  
и машин НТУУ «ХПИ» им. И.Сикорского  
Заслуженный деятель науки и техники Украины,  
Первый вице-президент Академии инженерных  
наук Украины, д.т.н., проф. Струтинский В.Б.

*От ДНТУ*

Сегодня, когда научно-техническая общественность Украины отдаст дань памяти известнейшему ученому, ведущему специалисту в области технологии машиностроения и проектирования металлорежущих станков, Юрию Викторовичу Тимофееву, мне также хочется сказать несколько хороших слов о нем и о той роли, которую он сыграл в моей жизни.

Юрий Викторович Тимофеев навсегда останется в моей памяти как человек, который всегда находился на своем месте – прежде всего, на месте руководителя славным научным коллективом кафедры «Технология машиностроения и металлорежущие станки» Национального технического университета «ХПИ».

Моя первая встреча состоялась с Юрием Викторовичем весной 2001 года, когда я привезла материалы докторской диссертации с просьбой о возможной защите в Ученом Совете, председателем которого долгие годы был Юрий Викторович. Первое, что меня поразило в нем, так это искренняя заинтересованность проблемами собеседника и желание помочь совершенно незнакомому человеку, что сыграло очень важную положительную роль в моей дальнейшей научной судьбе.

Юрия Викторовича всегда отличали деловитость, организованность, принципиальность и одновременно внимательное, чуткое отношение к людям, что обеспечивало ему уважение и любовь всех, кто сталкивался с ним по работе и по жизни. Будучи крупным ученым, обладая высокими эрудицией, внутренней культурой, квалификацией педагога, научного работника и руководителя он вкладывал много труда и терпения в подготовку специалистов - технологов, повышение

эффективности научно-исследовательской работы. Я уверена, что дело Юрия Викторовича будет жить и развиваться в трудах его учеников.

Многие поколения ученых Украины, в том числе и я, с полным основанием могут считать Юрия Викторовича своим Учителем, Учителем с большой буквы. Наша задача – попытаться достойно продолжить славное дело Учителя.

Профессор кафедры горных машин и мехатронных систем машиностроения  
Донецкого национального технического  
Университета  
д.т.н., проф. Калафатова Л.П.

*От НАУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

С Юрием Викторовичем мы познакомились более тридцати лет назад, когда я стал помогать ему в открытии совета по защите докторских диссертаций в ХПИ. Тогда мне удалось получить поддержку у ректора ХАИ профессора Березюка Н.Т. и таким образом, общими усилиями был открыт совет по двум специальностям «Технология машиностроения» и «Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент», что сыграло решающую роль в развитии кафедры Юрия Викторовича, да и всего ХПИ. Защиты кандидатских и докторских диссертаций обеспечили кадрами не только кафедру, но и другие вузы страны. Юрия Викторовича отличала высокая требовательность к себе и своим сотрудникам и соискателям, она удачно сочеталась с человечностью во взаимоотношениях с подчиненными, коллегами, аспирантами и докторантами. Творческая атмосфера, царившая на кафедре, давала импульс к достижению высоких целей развития кафедры. Этому же способствовал его неиссякаемый юмор, который мог разрядить самую сложную ситуацию.

Юрий Викторович много лет работал в экспертном совете ВАК и аттестационной комиссии МОН, о нём часто вспоминают и рассказывают о его плодотворной работе и вспоминают многие его удачные шутки. Его длительная работа председателем совета по защите докторских диссертаций в ХПИ отличались умением найти рациональное зерно в каждой работе и помочь соискателю на заключительном этапе подготовки диссертации.

О Юрии Викторовиче Тимофееве ещё долго будут вспоминать его друзья, ученики и те, с кем ему пришлось общаться.

Академик международной академии наук  
и инновационных технологий (МАНИТ),  
Академии инженерных наук Украины (АИНУ),  
д.т.н., профессор, профессор  
Национального аэрокосмического  
университета им. М.Е. Жуковского «ХАИ»  
Костюк Г.И.

*От СумГУ*

Как-то непривычно говорить о Юрии Викторовиче в прошедшем времени и трудно смириться, что

всё это осталось в прошлом, в том недалёком прошлом, когда мы все находились под напором его энергии и обаяния. По сути, Юрий Викторович является родоначальником Сумской научной школы технологии машиностроения. Будучи еще научным руководителем Захарова Николая Владимировича, он принимал непосредственное участие в становлении «на крыло» всех его учеников. Не зависимо от возраста, «за глаза», мы все называли его своим дедом «от науки». Этот человек обладал колоссальной научной энергией и запасом знаний. Помню, он всегда говорил: «Спрашивайте меня, у меня много информации, я должен ей успеть поделиться». Он обладал даром научного убеждения, и в научных диспутах, аргументировано обосновывал свою позицию, с которой мы «зеленые» ученые поначалу не всегда соглашались, но со временем, понимали, что именно это решение в данных условиях было наиболее правильным. Я не помню, чтоб Юрий Викторович когда-то повышал голос. Ему хватало мудрости и знаний в спокойном тоне убедить своего оппонента.

Чуткость и внимательность, которые были ему присущи, проявлялись и в его отношении к людям. Он был скуп на сантименты, но его крепкое рукопожатие и «отеческое» напутственное объятие стоили многих слов.

Прошлого не вернешь. Юрия Викторовича уже нет с нами. Однако память о нем и результаты многочисленных дел, которые он успел сделать, останутся как у тех, кто его помнит, так и у новых поколений – учеников его учеников.

*Коллектив СумГУ*

УДК 621.865.6

*Г.И. КОСТЮК, РАЗМАДЖУИ БЕХЗАД***ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР НА ТВЕРДОМ СПЛАВЕ ВК8 ПРИ ДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Досліджено максимальні температури і максимальні температурні напруження при дії лазерного випромінювання щільністю теплового потоку від  $10^{12}...10^{16}$  Вт / м<sup>2</sup> і часу дії  $10^{-16}...10^{-10}$  с. Також для цих режимів наведено швидкості зростання температури і отримано просторові картини залежностей об'єму нанокластера від щільності теплового потоку та часу його дії при двох розмірах плями  $5 \cdot 10^7$  і  $10^6$  м. Усе це дозволяє знайти технологічні режими отримання наноструктур у твердому сплаві ВК8 і вибирати їх з урахуванням можливостей технологічних установок і найнижчий рівень споживання електроенергії.

**Ключові слова:** наноструктури, твердий сплав, фемтосекундний лазер.

Исследованы максимальные температуры и максимальные температурные напряжения при действии лазерного излучения плотностью теплового потока  $10^{12}...10^{16}$  Вт / м<sup>2</sup> и времени действия  $10^{-16}...10^{-10}$  с. Также для этих режимов исследованы скорости нарастания температуры и получены пространственные картины зависимостей объёма нанокластера от плотности теплового потока и времени его действия при двух размерах пятна  $5 \cdot 10^7$  и  $10^6$  м.

Всё это позволяет найти технологические режимы получения наноструктур в твёрдом сплаве ВК8 и выбирать их с учётом возможности технологических установок и минимального энергопотребления.

**Ключевые слова:** наноструктури, твердый сплав, фемтосекундний лазер.

In the paper, the maximum temperature and maximum thermal stresses under the action of laser radiation heat flux from  $10^{12}...10^{16}$  W / m<sup>2</sup>, and the time of action of  $10^{-16}...10^{-10}$  seconds. Also for these regimes investigated the rate of rise of temperature and obtained the spatial pattern dependencies nanocluster volume of the heat flux density and the time of its action in two sizes  $5 \cdot 10^7$  and  $10^7$  m.

All this allows you to find process conditions for fabricating nanostructures in solid alloy WC0,92+Co0,08 and select them taking into account the possibility of technological installations and minimal power consumption.

**Keywords:** nanostructures, hard alloy, femtosecond laser.

**Введение.** В настоящее время появились лазерные установки, работающие в фемтосекундном диапазоне времени и обеспечивающие высокие частоты следования импульса, что позволяет использовать их в технологических установках. В то же время есть возможность использовать и обычные лазеры, действующие при времени порядка  $10^{-12}...10^{-10}$  с и относительно невысоких плотностях теплового потока  $10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>. Такие исследования теоретически не проводились особенно в фемтосекундном диапазоне времени, что говорит о важности этого исследования для повышения работоспособности и эффективности режущего инструмента из твёрдого сплава ВК8.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций», «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

**Состояние вопроса.** Несмотря на то что исследованию наноструктур посвящено большое количество

работ, включая монографии [1 - 11], а теоретическому исследованию получения наноструктур значительное количество работ [1 - 3], да и они посвящены получению наноструктур при действии потоков заряженных частиц. Серьёзных теоретических исследований получения НС при действии лазерного излучения, действующего в фемтосекундном диапазоне, практически не проводилось, исключение составило несколько наших работ [10 - 11]. В случае фемтосекундных лазеров процессы протекают очень быстро и очевидно, что теплофизические и термомеханические характеристики, полученные классическими методами, могут быть неприемлемы, поэтому необходимо использовать их теоретические значения, полученные привлекая квантово механический подход.

Всё изложенное выше говорит об актуальности и своевременности проводимого исследования для машиностроения и в частности производства режущего инструмента из твёрдых сплавов, что позволит значительно повысить эффективность (снимаемый объём материала за период стойкости) и работоспособность инструмента.

**Постановка задачи исследования.** Проводилось решение совместной задачи теплопроводности и термоупругости в зоне действия лазерного излучения на твёрдый сплав ВК8, причём теплофизические и термомеханические характеристики материала рассчитывались с применением квантово механического подхода.

В результате расчётов получены поля температур и температурных напряжений, скорости роста температур, а также объём нанокластера в зависимости от технологических режимов обработки. Учитывая критерии наноструктур, рассчитывались объёмы

© Г.И. Костюк, Размаджуй Бехзад, 2016

зон, где возможно получения наноструктур и фиксировались их технологические параметры образования.

### Результаты расчётов и их обсуждение.

Результаты исследования зависимости максимальных температур на разных глубинах в зависимости от плотности теплового потока показаны на рис. 1 для различного времени действия: а –  $t = 10^{-10}$  с;

б –  $t = 10^{-11}$  с; в –  $t = 10^{-12}$  с; г –  $t = 10^{-13}$  с; д –  $t = 10^{-14}$  с; е –  $t = 10^{-15}$  с; ж –  $t = 10^{-16}$  с.

Видно, что в зоне температур, необходимых для получения наноструктур (500...1500 К), лежит значительная область от  $x = 0$  до  $x = 2,37 \cdot 10^{-7}$  при  $t = 10^{-10}$  с. Тогда как при  $t = 10^{-13}$  с эта зона уменьшилась от  $x = 0$  до  $x = 7,48 \cdot 10^{-9}$  м, а при  $t = 10^{-16}$  с она уже снижается  $10^{-10}$  м.

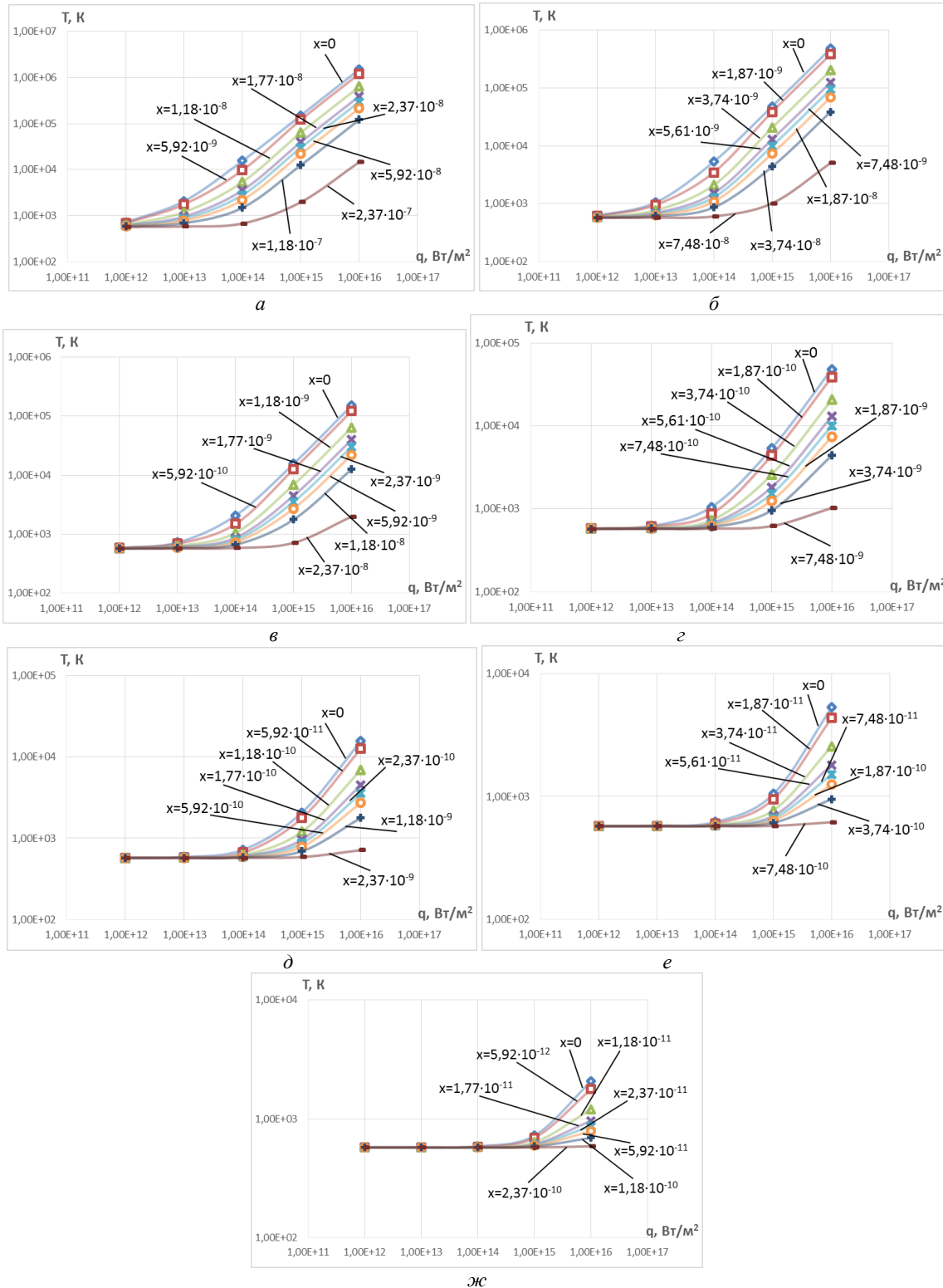


Рис. 1 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t = 10^{-10}$  с; б –  $t = 10^{-11}$  с; в –  $t = 10^{-12}$  с; г –  $t = 10^{-13}$  с; д –  $t = 10^{-14}$  с; е –  $t = 10^{-15}$  с; ж –  $t = 10^{-16}$  с



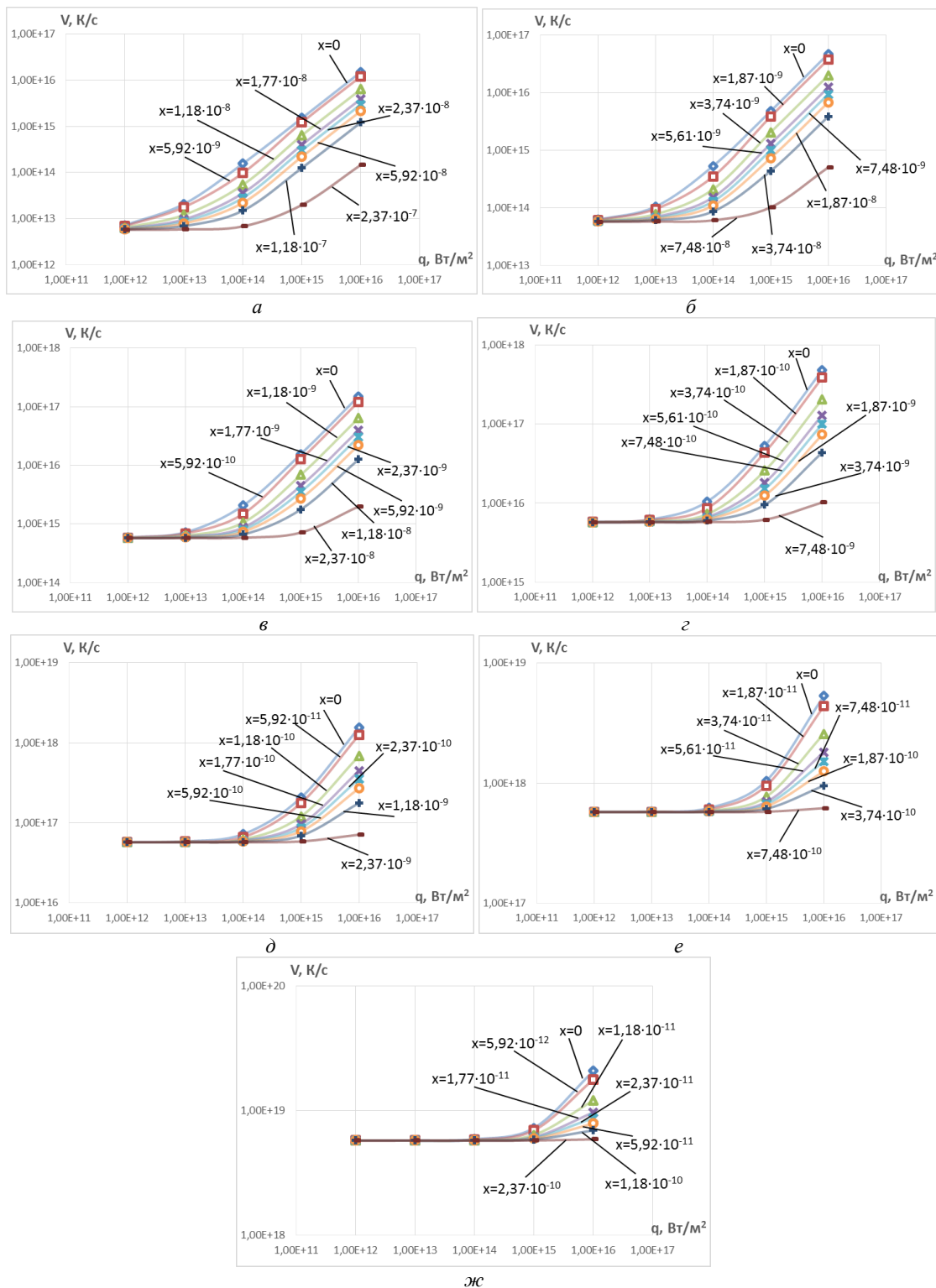


Рис. 2 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t = 10^{-10}$  с; б –  $t = 10^{-11}$  с; в –  $t = 10^{-12}$  с; г –  $t = 10^{-13}$  с; д –  $t = 10^{-14}$  с; е –  $t = 10^{-15}$  с; ж –  $t = 10^{-16}$  с

На рис. 2 показаны скорости изменения максимальной температуры на твёрды сплав ВК8 от плотности теплового потока на разных глубинах при том же времени действия.

Анализ этих зависимостей показывает, что практически для всех режимов по критерию скорости нарастания максимальной температуры условия образования НС выдерживается (более  $10^7$  К/с).

Анализ этих зависимостей показывает, что практически для всех режимов по критерию скорости нарастания максимальной температуры условия образования НС выдерживается (более  $10^7$  К/с).

На рис. 3 показаны зависимости температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ВК8 от плотности теплового потока на разных глубинах при том же времени действия. Видно, что при

большем времени действия и значительных плотностях теплового потока температурные напряжения могут приближаться до  $10^{12}$  Па. С уменьшением времени они уменьшаются и составляют  $10^{10}$  Па при  $10^{13}$  с, и снижаются до  $10^9$  Па при  $10^{-16}$  с.

Анализ зависимостей на рис. 3 позволяет заключить, что значения температурных напряжений высоки и в ряде случаев они могут непосредственно приводить к образованию наноструктур, а в остальных – существенно ускорять получение наноструктур.

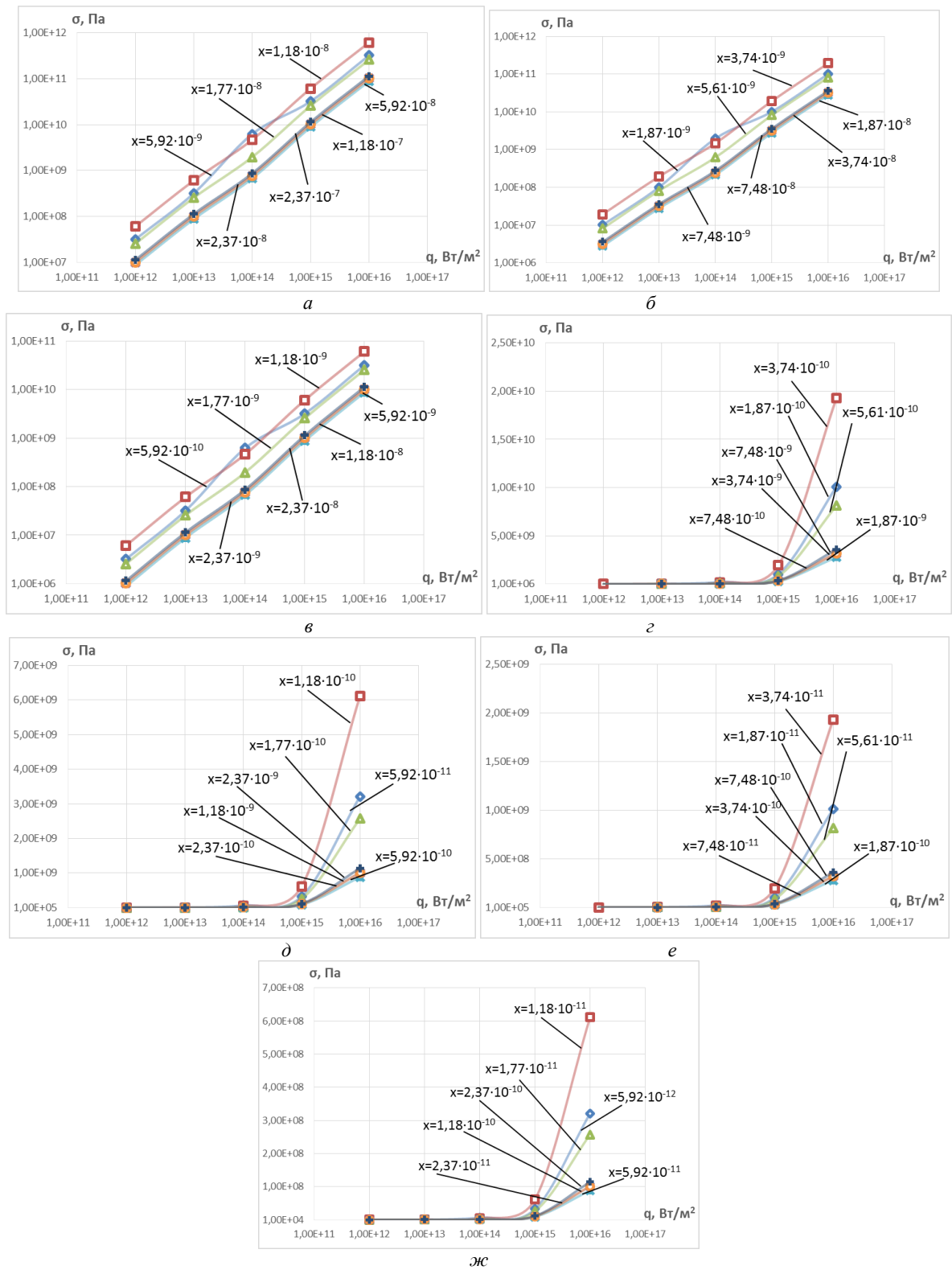


Рис. 3 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ВК8 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t = 10^{-10}$  с; б –  $t = 10^{-11}$  с; в –  $t = 10^{-12}$  с; г –  $t = 10^{-13}$  с; д –  $t = 10^{-14}$  с; е –  $t = 10^{-15}$  с; ж –  $t = 10^{-16}$  с

Для решения вопроса выбора технологических параметров необходимых для получения наноструктур построены трехмерные зависимости объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения и времени его действия для радиуса пятна  $R=10^{-6}$  м (рис. 4) и  $R=5 \cdot 10^{-7}$  м (рис. 5). Полученные поверхности позволяют выбрать технологические режимы в зависимости от требуемого зерна, его объема, есть также возможность выбора технологических параметров: плотности теплового потока излучения и времени его действия.

В случае, когда известны физико-механические характеристики материала в зависимости от размера зерна [1 - 4] и требуемые свойства обработанного материала (техническое задание) можно выбрать необходимый размер зерна, а определив объем его по зависимостям (рис. 4 и 5), можно получить необходимые технологические параметры для достижения требуемых физико-механических характеристик.

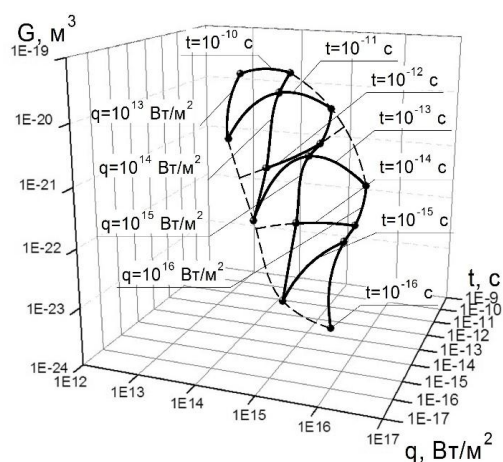


Рис. 4 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения –  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры ( $R=10^{-6}$  м) (BK8)

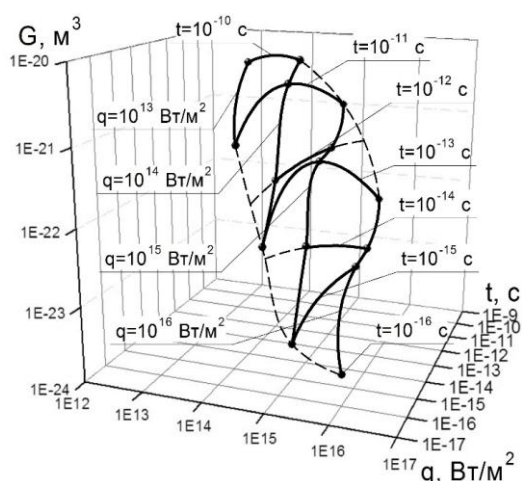


Рис. 5 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры ( $R=5 \cdot 10^{-7}$  м) (BK8)

Всё это говорит о том, что есть возможность научных предпосылок для выбора технологических

параметров лазерной обработки как при действии обычного лазера, так и фемтосекундного.

**Выводы.** Получены зависимости максимальных температур и температурных напряжений, а также скорости роста максимальной температуры, что позволяет оценить технологические параметры, при которых есть вероятность получения наноструктур.

Показано, что в зоне исследованных технологических параметров лазера плотность теплового потока в диапазоне  $10^{12} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> и времени действия  $10^{-16} \dots 10^{-10}$  с обнаружено, что есть реальная возможность получения НС только вследствие действия температурных напряжений в отдельных режимах, тогда как в остальных режимах температурные напряжения ускоряют образование НС. Скорости роста температур практически всегда обеспечивают высокую вероятность получения НС.

Проведенное исследование позволяет определить необходимые технологические параметры для получения требуемых физико-механических характеристик (ФМХ), если имеются для данного материала зависимости разных ФМХ от размера зерна.

#### Список литературы

1. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями: Моногр.-справ.: в 2 кн. / Г. И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. Костюк Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. Костюк Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк Г. И. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АНУ, 2003. – 412 с.
8. Гречихин Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
11. Андриевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.

#### Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhashchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur: monogr* [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.

3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologii, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
5. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologii: ucheb.posobiye* [The scientific basis for the creation of modern technologies] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2008. 552 p.
6. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
7. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, AINU, 2003. 412 p.
8. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologii* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
9. Aksenov, I. I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy* [Vacuum arc erosion plasma sources] – Kharkiv, NII «KHFTI», 2005. 211 p.
10. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
11. Andriyevskiy, R. A. *Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy* [Nanomaterials: concept and modern problems] Fizika metallov i metallovedeniye. 2003. – T. 91, № 1. – p.p. 50 – 56.

Поступила (received) 04.08.2016

**Дослідження можливості отримання наноструктур на твердих сплавах ВК8 при дії імпульсного лазерного випромінювання малої тривалості / Г. І. Костюк, Размджуй Бехзад // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 7–12. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Исследование возможности получения наноструктур на твердом сплаве ВК8 при действии импульсного лазерного излучения малой длительности / Г. И. Костюк, Размджуй Бехзад // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 7–12. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Study opportunities nanostructures on hard alloy WCCo8 under pulsed laser radiation of short duration / G. I. Kostyuk, Razmdzhui Bekhzad // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.7–12. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технических наук, профессор Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», м. Харьков; тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Kostyuk Gennadiy Igorevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovsky, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Размджуй Бехзад** – аспірант, кафедри теоретичної механіки, машинознавства і роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків; тел.: (057) 788-42-06; e-mail: gennadiykostuk206@gmail.com;

**Размджуй Бехзад** – аспирант кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков; тел.: (057) 788-42-06; e-mail: gennadiykostuk206@gmail.com;

**Razmdzhui Behzad** – graduate student at the Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic-Mechanical systems, the National Aerospace University named by N. E. Zhukovsky «Kharkov aviation institutes», Kharkov; tel.: (057) 788-42-06; gennadiykostuk206@gmail.com

УДК 621.924.56.001.5

Ю. А. СИЗЫЙ, Э. Г. ЧАЙКА, А. Н. УШАКОВ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ В СТАНКАХ

У статті аналізується аналітичний опис фрикційних релаксаційних автоколебань і відзначається його гідність - запропонована формула розрахунку критичної швидкості повзуна в системах з малим демпфуванням. Недолік аналізованого опису - відсутність фази вистою при русі повзуна. Запропоновано модель фрикційних автоколебань, що реалізує рух повзуна зі стрибками і зупинками, за графіками якого легко встановити критичну швидкість без обмеження на величину демпфірування.

**Ключові слова:** малі переміщення, фрикційні автоколебання, критична швидкість, пакет VisSim.

В статье анализируется аналитическое описание фрикционных релаксационных автоколебаний и отмечается его достоинство – предложена формула расчета критической скорости ползуна в системах с малым демпфированием. Недостаток анализируемого описания – отсутствие фазы выстоя при движении ползуна. Предложена модель фрикционных автоколебаний, реализующая движение ползуна со скачками и остановками, по графикам которого легко установить критическую скорость без ограничения на величину демпфирования.

**Ключевые слова:** малые перемещения, фрикционные автоколебания, критическая скорость, пакет VisSim.

The article analyzes the analytical description of frictional self-oscillations of relaxation adapted shove by PushV.E. with regard to the system of small movements in machine tools. It notes the importance of their dignity - received critical crosshead speed formula is applied to systems with low damping. However, the graphical analysis showed that the resulting solution is not a movement with periodic stops, and concluded that a purely analytical operations without programming integration to stop it, and the resumption of the movement to stop and jump phases can not be obtained. An original model of frictional self-oscillations in VisSim package that allows to realize the movement of the slide with jumps and stops. The graphs of these movements by varying the speed of movement can be easily and clearly set the critical speed without any restrictions on the amount of friction damping in the system.

**Keywords:** small movements, friction self- excited oscillation, critical velocity, VisSim package.

**Введение.** При малых перемещениях в металло-режущих станках с малой скоростью возможно возбуждение фрикционных автоколебаний, что отрицательно сказывается на точности этих перемещений и качестве обработки.

Наиболее полно аналитическое решение задачи фрикционных автоколебаний представлено в работах Пуша В.Э. [1,2]. Однако анализ полученных решений обнаруживает ряд их недостатков. Устранение их возможно моделированием в пакете VisSim с применением для интегрирования блока «Reset integrator», позволяющего периодически останавливать процесс интегрирования и возобновлять его.

**Раздел 1. Анализ аналитических решений в работах [1–3].** В этих работах рассматривается привод, показанный на рис. 1а, в котором задающий механизм 2, осуществляя перемещение со скоростью  $V$ , через упруго-деформирующую связь с жесткостью  $C$  и коэффициентом демпфирования  $h$ , перемещает ползун 1 массой  $m$  скользящий по неподвижной поверхности пары трения. При этом принимается нелинейная характеристика трения, показанная на рис. 1б, где  $F_n$  – сила трения покоя,  $F_d$  – сила трения движения.

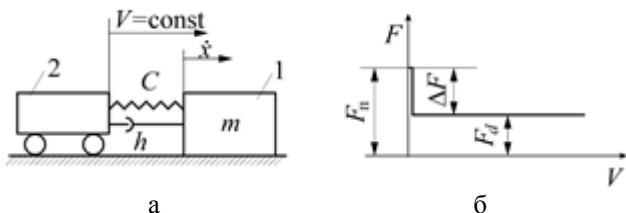


Рис. 1 – Схема взаимодействия ползуна 1 с задающим перемещение ползуну механизмом 2 и упрощенная характеристика процесса трения

При такой характеристике трения и при наличии силы демпфирования пропорциональной относитель-

ной скорости ползуна и задающего механизма, уравнение движения ползуна:

$$\Delta F - C(x - Vt) = m\ddot{x} + h(\dot{x} - V), \quad (1)$$

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0 \cdot \dot{x} = \omega_0^2 Vt + \frac{\Delta F}{m} + 2\xi\omega_0 V, \quad (2)$$

где  $\xi = \frac{h}{2\sqrt{C \cdot m}}$  – относительный коэффициент

демпфирования,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{m}}$  – частота собственных колебаний ползуна на пружине,  $t$  – время.

При  $\xi < 1$  получено [1,2] следующее решение для перемещения ползуна  $-x$  и скорости его перемещения  $-\dot{x}$ :

$$x = Vt + \frac{\Delta F}{C} + \frac{V}{\omega_0} e^{-\xi\omega_0 t} [(2\xi - A)\cos\omega_0 t - (1 + A\xi)\sin\omega_0 t], \quad (3)$$

$$\dot{x} = V \left\{ 1 - e^{-\xi\omega_0 t} [\cos\omega_0 t + (\xi - A)\sin\omega_0 t] \right\}, \quad (4)$$

где  $A = \frac{\Delta F}{A_k \sqrt{Cm}}$ .

Для системы описанной уравнениями (1,2) существует критическая скорость  $V_k$  задающего механизма, ниже которой ползун движется скачками. Эта скорость определяется из условия равенства нулю скорости  $\dot{x}$  и ускорения  $\ddot{x}$ , чему соответствует  $A = A_k$  и, соответственно

$$V_k = \frac{\Delta F}{A_k \sqrt{Cm}}, \quad (5)$$

или

$$V_k = \frac{\Delta f N}{A_k \sqrt{Cm}}, \quad (6)$$

где  $N$  – нормальная нагрузка на поверхность трения;  $\Delta f = f_0 - f_d$ ;  $f_0$  – коэффициент трения покоя;  $f_d$  – коэффициент трения движения.

При малых значениях относительного коэффициента демпфирования  $\xi$  зависимость, получаемую из условия  $\dot{x} = 0$ ,  $\ddot{x} = 0$ , можно аппроксимировать выражением

$$A_k \cong \sqrt{4\pi\xi}, \quad (7)$$

В [2] показан характер изменения скорости ползуна  $\dot{x}$  во времени согласно рис. 2, где  $t_1$  – время скачка;  $t_2$  – время выстоя.

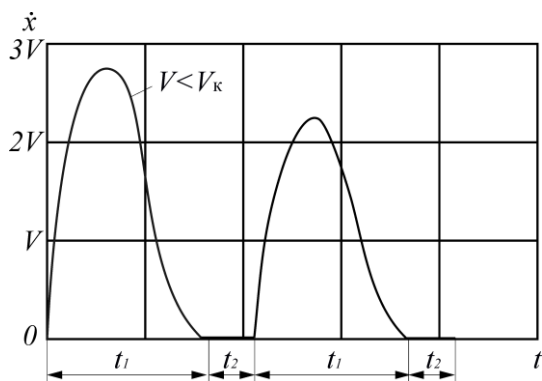


Рис.2 – Изменение скорости ползуна при скачкообразном его движении

Описанные результаты исследования автоколебаний особенно интересны тем, что вводится величина  $A$ , в которой заложены все важнейшие параметры системы трения –  $\Delta F$ ,  $V$ ,  $C$  и  $m$  за исключением  $h$ , а также тем, что получена формула критической скорости (6), и с подстановкой (7) она дает выражение удобное для применения на практике, т.е. для формирования параметров системы, позволяющих исключить скачкообразное движение ползуна.

$$V_k = \frac{\Delta F N}{\sqrt{4\pi\xi C m}}, \quad (8)$$

В [3] Орликовым М.Л. решается задача фрикционных автоколебаний приближенно без учета демпфирования в связи задающего механизма и ползуна, т.е. уравнение движения ползуна принимается следующим:

$$F_n - C(x - Vt) - F_d = m\ddot{x}, \quad (9)$$

или

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \omega_0^2 Vt + \frac{\Delta F}{m}.$$

Решение уравнения (9) при начальных условиях  $x(t=0) = 0$  и  $\dot{x}(t=0) = 0$  определяет закон перемещения ползуна

$$x = Vt - \frac{V}{\omega_0} \sin \omega_0 t + \frac{\Delta F}{C} (1 - \cos \omega_0 t). \quad (10)$$

Этот закон движения  $x(t)$  и  $\dot{x}(t)$  Орликов М.Л. иллюстрирует графиками, показанными на рис. 3.

Графики на рис. 2 и рис. 3 перемещения ползуна и его скорости не являются следствием их математическому описанию соответствующими уравнениями (4) и (10). Они являются субъективной графической интерпретацией этих решений их авторами.

Покажем это на примере привода подачи тяжело-го долбежного станка мод.747 взятого из [1].

Параметры привода приведены в системе единиц принятых в СССР в 60-ые годы прошлого века: жесткость привода  $1,41 \cdot 10^5$  кгс/мм, нормальная нагрузка на направляющие  $N = 55 \cdot 10^3$  кгс,  $df = 0,1$ ,  $\xi = 0,1$ , ускорение свободного падения  $g = 9810$  мм/с<sup>2</sup>. Согласно этих данных рассчитаны прочие параметры  $m$ ,  $\omega_0$ ,  $A$  необходимые для расчета  $x$  и  $\dot{x}$  согласно уравнений (3) и (4) и приведены на рис.4, на котором также приведены и зависимости  $x(V,t)$  согласно (3) и  $\dot{x}(V,t)$ , обозначенное как  $x_1(V,t)$ , согласно (4).

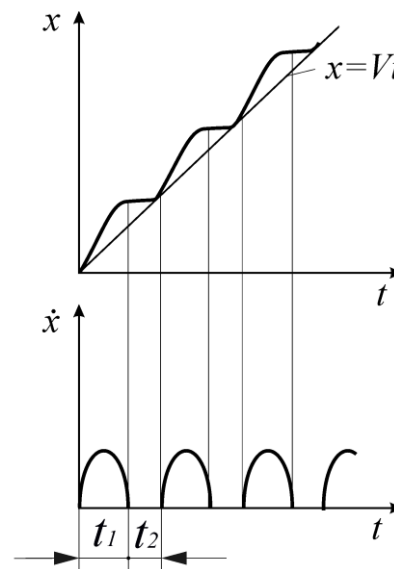


Рис.3 – Графики процесса фрикционных автоколебаний ползуна

В этих зависимостях хорошо видно, что в неравномерном движении стола станка фазы «выстоя», т.е. остановки в течение какого-то времени, не наблюдается, в отличие от приведенного в [1,2] и показанного на рис. 2.

Для данного примера рассчитано значение критической скорости  $V_k$  по (8) равное 5,5 мм/с (см. рис.4). Диапазон изменения скорости  $V$  на рис. 4 охватывает значения от 1 мм/с до 7 мм/с и на графиках видно, что неравномерное перемещение стола достаточно быстро, в течение, примерно 0,2 сек., затухает и переходит в равномерное. Причем этот характер имеет место для  $V < V_k$ , так и для  $V > V_k$ . Таким образом, по графикам рис. 4 невозможно уверенно определить при какой же скорости  $V$  задающего механизма перемещение стола можно считать равномерным.

Если не учитывать демпфирование в приводе, т.е. воспользоваться приближенным решением Орликова М.Л. [10], то также фазы «выстоя» не наблюдается, что видно из рис. 5.

Если решать уравнения (1) и (6), в пакете VisSim [4] методом понижения производной, то результаты такого моделирования оказываются точно такими же, что и аналитические их решения, приведенные на графиках рис.4 и рис.5.

Из выполненного анализа следует, что, описывая движения ползуна по неподвижной поверхности уравнениями (1) и (6), закладывая в них логику скачкообразного движения с фазами «скачка» и «выстоя», реализовать её не удается.

$$\begin{aligned} \zeta &:= 1.41 \cdot 10^{-5} \quad N_w := 55 \cdot 10^3 \quad g := 9810 \\ m_w &:= \frac{N}{g} = 5.607 \quad df := 0.1 \quad \zeta := 0.1 \quad i := 0..3 \\ \Delta v &:= 2 \quad v_i := 1 + \Delta v \cdot i \quad \Delta F := N \cdot df = 5.5 \times 10^3 \\ \omega_0 &:= \sqrt{\frac{c}{m}} = 158.585 \quad A := \frac{\Delta F}{2 \cdot \sqrt{c \cdot m}} = 3.093 \\ t &:= 0, 0.00001 .. 0.25 \\ x(v, t) &:= v \cdot t + \frac{\Delta F}{c} + \frac{v}{\omega_0} \cdot e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot [(2 \cdot \zeta - A) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) - (1 + A \cdot \zeta) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)] \end{aligned}$$

$$x1(v, t) := v \cdot [1 - e^{-\zeta \cdot \omega_0 \cdot t} \cdot [\cos(\omega_0 \cdot t) + (1 - A \cdot \zeta) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)]]$$

$$V_k := \frac{df \cdot N}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \zeta \cdot c \cdot m}} = 5.518$$

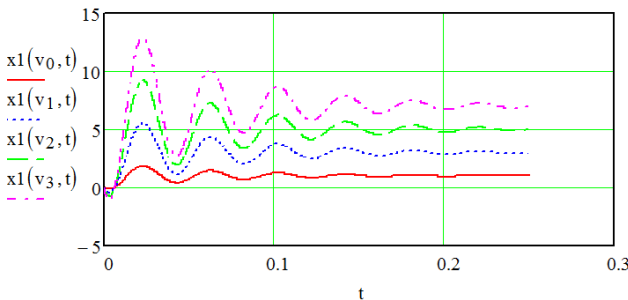
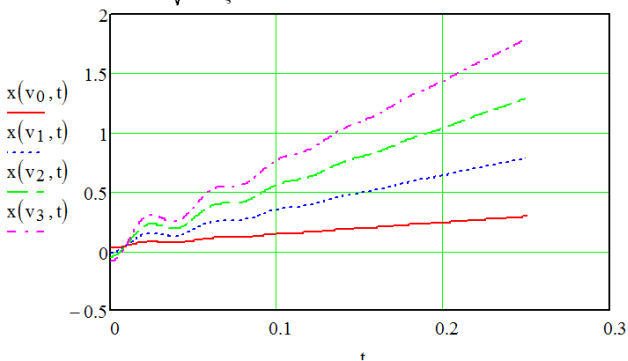


Рис.4 – Графики зависимостей перемещения  $x(V, t)$  и скорости перемещения  $x_1(V, t)$  стола долбежного станка мод. 747

$$x2(v, t) := v \cdot t - \frac{v}{\omega_0} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{\Delta F}{c} \cdot (1 - \cos(\omega_0 \cdot t))$$

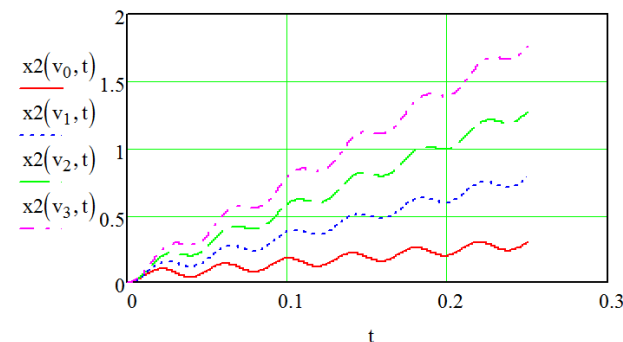


Рис. 5 – Перемещение стола станка мод. 747 без учета демпфирования

Очевидно, вообще невозможно её реализовать без приемов программирования, позволяющих управ-

лять алгоритмом интегрирования периодически останавливая его и вновь возобновляя.

**Раздел 2. Анализ модели фрикционных автоколебаний в примере к пакету VisSim.** Задача, аналогичная рассмотренной, приведена в качестве примера в пакете VisSim под названием «Stuck block» [4,5].

В этом примере рассматривается движение массы, лежащей на горизонтальной поверхности. На массу в направлении параллельном поверхности (координата  $x$ ) действует сила, изменяющаяся по закону синусоиды относительно нулевого уровня. Эта сила заставляет перемещаться массу в направлениях  $+x$  и  $-x$ .

Перемещению массы сопротивляется сила трения скольжения характеристика, которой такая же, как и в рассмотренной задаче, показанная на рис. 1б. Амплитуда гармонической силы превышает силу трения покоя  $F_{\text{п}}$ .

В примере четко не поясняются какие еще силы действуют на массу. Однако из модели ясно, что на массу действуют еще силы пропорциональные её смещению, т.е.  $x$ , и скорости такого смещения  $\dot{x}$ . Поскольку перемещение массы происходит в плюс и минус координаты  $x$  с остановками, т.е. фазой, когда  $x = 0$ , можно заключить, что масса через упруго – деформирующую связь соединена с неподвижной стенкой. Именно в этом случае при её движении в направлении  $x$  будут действовать на неё ещё силы упругости, пропорциональные смещению  $x$ , и демпфирования, пропорциональные  $\dot{x}$ .

Таким образом, приведенная модель «Stuck block» отличается от рассматриваемой задачи тем, что масса принудительно не перемещается каким-то задающим механизмом (см. рис. 1а).

Однако в модели «Stuck block» используются приемы моделирования приемлемые и для рассматриваемой задачи.

Возможность остановки алгоритма интегрирования в «Stuck block» решается интегратором со сбросом «Reset Integrator» в сочетании с блоком «Cross Detect» (детектор перехода). Схема соединения этих блоков показана на рис. 6. Интегратор со сбросом интегрирует сигнал, подаваемый на верхний вход, т.е.  $\ddot{x}(t)$ . Средний вход служит для управляющего сигнала, а нижний для задания уровня сброса. Этот уровень сброса задается блоком детектора перехода, который имеет один вход и один выход. В окне блока задается уровень перехода «Cross Point», который по умолчанию равен нулю, что подходит для рассматриваемого примера программирования фрикционных релаксационных автоколебаний.

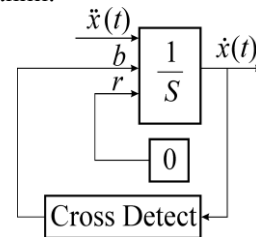


Рис. 6 – Схема соединения интегратора Reset Integrator с детектором перехода Cross Detect

Когда выходной сигнал интегратора  $\dot{x}(t)$  переходит уровень сброса сверху, то на выходе «Cross Detect» будет  $-1$ , а когда  $\dot{x}(t)$  переходит уровень сброса снизу, то на выходе будет  $+1$ . При подаче  $-1$  или  $+1$  на средний вход интегратора, на выходе интегратора со сбросом с задержкой на один шаг интегрирования подается сигнал с нижнего входа интегратора, т.е. ноль как показано на рис. 6. Интегратор прекращает интегрирование и на выходе его устанавливается  $\dot{x} = 0$ . Движение массы прекращается.

В «Stuck block» также решается при помощи блоков «not equal to» (не равно), «merge» и «min» программирование формирования сил на массе в фазы движения её (скачка) и выстоя.

**Раздел 3. Разработка модели фрикционных релаксационных автоколебаний в приводе подачи металлорежущего станка.** Указанные выше элементы программирования задачи в «Stuck block» могут быть использованы для рассматриваемой в статье модели фрикционных автоколебаний приведенной на рис. 7 согласно схемы рис. 1 и дифференциального уравнения (1). Исходные данные те же, что и для рис. 4, рис. 5.

В начальный момент времени  $t$ , когда ползун неподвижен  $\dot{x} = 0$ , а задающий механизм начинает двигаться  $V \neq 0$ , то ползун находится в состоянии статического равновесия под действием силы трения покоя  $F_{ip} = f_0 N$ , и величины силы заставляющей сдвинуться ползун. Эта сила  $F_1$  равна силе сжатия пружины  $Cvt$  где  $Vt$  – величина сжатия пружины, а  $C$  – жесткость пружины, и с учетом силы сопротивления сжатию пружины, т.е. демпфирования –  $hV$

$$F_1 = Cv t + hV . \quad (11)$$

Уравнение (11) следствие из уравнения (1) при  $x = 0, \dot{x} = 0, \ddot{x} = 0$ .

В эту фазу выстоя на выходе блока «не равно» формируется ноль т.к. неравенство нулю  $\dot{x}$  не соблюдается. Этот ноль подается на верхний вход блока «merge», который пропускает сигнал с нижнего входа.

На этот вход приходит минимальная сила из двух  $F_{ip}$  и  $F_1$ , что выполняется блоком «min». Сила  $F_1$  со временем растет и когда она превысит силу  $F_{ip}$ , то ползун тронется. На входе сумматора, где суммируется выходной сигнал из блока «merge» со знаком минус и  $F_1$  со знаком плюс возникает положительный сигнал.

Делением на массу ползуна  $m$  получается ненулевое значение  $\frac{d^2x}{dt^2}$ , т.е. ползун трогается.

Причем  $\frac{d^2x}{dt^2}$  велико равно  $\frac{\Delta F}{m} \cong 1000 \text{ мм/с}^2$ . Ползун трогается скачком. При этом возникает скорость  $\frac{dx}{dt}$  на выходе

интегратора со сбросом, а на выходе блока «не равно» формируется единица и на выход блока «merge» пропускается сигнал со среднего его входа, т.е. величина трения движения  $F_{ts}$ . Ползун в фазе движения (скачка) находится в динамическом равновесии согласно (1) при  $(\ddot{x} \neq 0, \dot{x} \neq 0, x \neq 0)$ .

Таким образом, на ползун будет действовать сила, заставляющая его двигаться  $F_{ip} - C(x - Vt)$  за вычетом силы  $F_{ts}$  и силы демпфирования  $h(\dot{x} - V)$  препятствующих движению ползуна

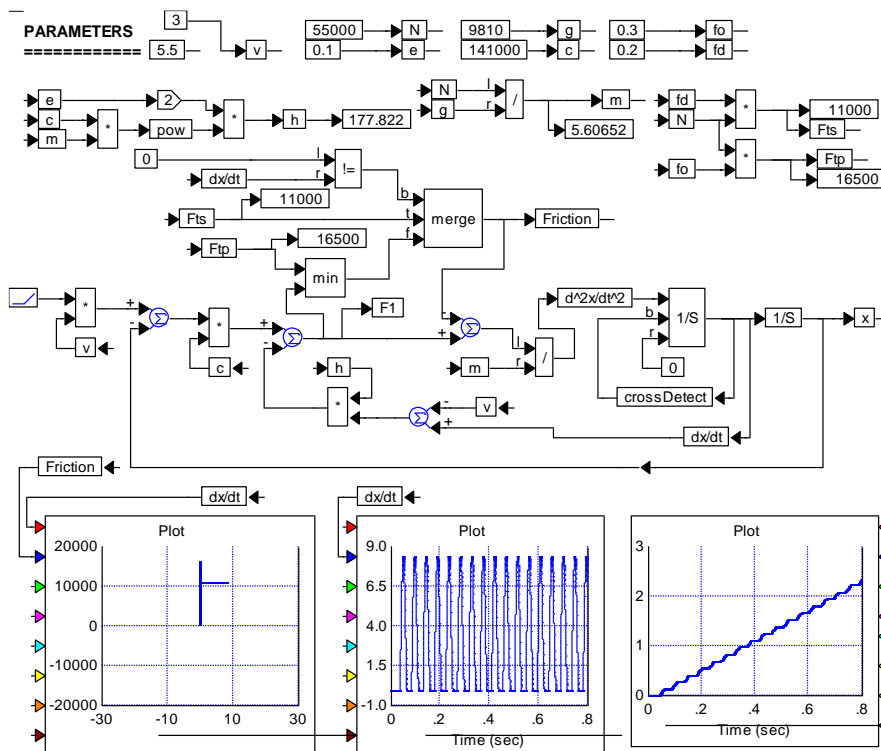


Рис. 7 – Блок – схема моделирования фрикционных релаксационных автоколебаний



$$F_{ip} - C(x - Vt) - F_{ts} - h(\dot{x} - V). \quad (12)$$

Эта сила уравновешивается согласно второму закону Ньютона силой инерции  $m\ddot{x}$ .

Следовательно, движения ползуна в фазу скачка будет соответствовать уравнению (1).

Скачкообразное перемещение ползуна, т.е. быстрый рост  $x(t)$  и  $\dot{x}(t)$  приводит к уменьшению силы

согласно (12) и при равенстве её нулю сигнал  $\frac{d^2x}{dt^2}$

меняет свой знак на противоположный. На управляющий вход «Reset Integrator» блоком «Cross Detect» подается единица и происходит сброс выходного сигнала интегратора до нуля. Движение ползуна прекращается.

При равенстве нулю  $\frac{dx}{dt}$  на выходе блока «не равно» формируется ноль и блок «merge» начинает пропускать на выход входной сигнал с нижнего своего входа. Таким образом, цикл движений ползуна «скачок, остановка» повторяется.

На рис. 7 выведены графики  $x(t)$  иллюстрирующие скачкообразное движение ползуна при  $V = 3$  мм/с с четко видимыми фазами скачка и выстоя.

На левом Plot рис. 7 выведена зависимость силы трения Friction от скорости  $\frac{dx}{dt}$ , из которого видно, что принятая нелинейная характеристика процесса трения (рис. 1.б) в модели соблюдается.

На рис. 8. показаны графики перемещения стола  $x(t)$  при различной скорости  $V$  мм/с привода подачи. Каждый график соответствует обозначенной на нем скорости  $V$ . На этом рисунке видно, что для скорости  $V \leq 4$  мм/с имеет место релаксационные колебания, т.е. колебания с четко выраженными фазами «скачка» и «выстоя».

Выше было показано, что критическая скорость  $V_k$  для рассматриваемого примера равна 5,5 мм/с. Из графиков рис. 8 видно, что для  $V > 4$  мм/с движение стола равномерное. Таким образом, результаты моделирования позволяют определить критическую скорость  $V_k$  близкую к расчетной по (8).

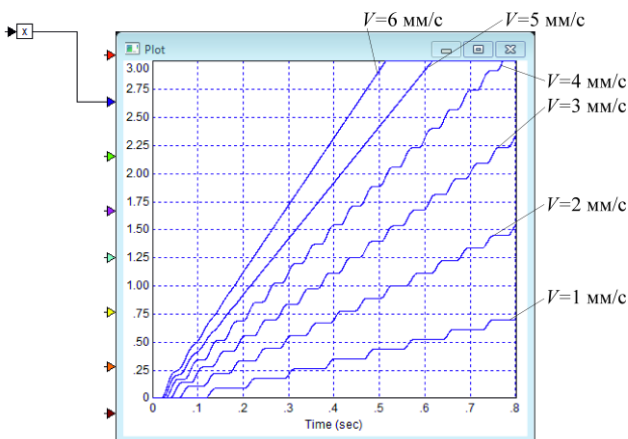


Рис. 8 – Перемещение станка модели мод.747 при различных значениях скорости подачи  $V$

Если по аналитической модели рис. 4 для всего диапазона скорости  $V = (1-7)$  мм/с движение после  $t \approx 0,2$ с становится равномерным и определение критической скорости по графикам невозможно, то при графическом анализе модели согласно рис.8 определение  $V_k$  достаточно очевидно.

Необходимо также отметить, что формула (8) как указано в [1,2] справедлива для системы трения при малых значениях относительного коэффициента демпфирования  $\xi$ . При этом возникает вопрос: «Какие значения  $\xi$  считать малыми? Когда можно пользоваться формулой (8) для определения критической скорости  $V_k$ ?»

Выводы.

1. Выполненный анализ исследований [1-3] фрикционных автоколебаний показывает, что описание их уравнениями (1) и (9) является движением ползуна без фазы выстоя, т.е. фактически представляет собой не релаксационные колебания, а квазигармонические.

2. По анализу графиков движения ползуна  $x(t)$ , согласно решения уравнений (1) и (9) невозможно определить критическую скорость  $V_k$ .

3. Разработана модель в пакете «VisSim», позволяющая воспроизводить релаксационные фрикционные автоколебания с четко обозначенными фазами «скачка» и «выстоя».

4. Варьируя скоростью  $V$  задающего механизма и наблюдая за характером движения ползуна  $x(t)$  по его графику, легко определить критическое значение  $V_k$  этой скорости, при которой скачкообразное движение ползуна переходит в равномерное. При этом такой поиск значения  $V_k$  не ограничивается величиной коэффициента демпфирования  $\xi$ .

#### Список литературы

1. Пуш В. Э. Малые перемещения в станках. – М. : Государственное научно – техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. – 123 с.
2. Пуш В. Э. Конструирование металлорежущих станков. – М. : Машиностроение, 1977. – 390 с.
3. Орликов М. Л. Динамика станков. – К. : Выща школа, 1989. – 272 с.
4. Дьяконов В. П. VisSim + Mathcad + MatLAB. Визуальное математическое моделирование. – М. : Солон – Пресс школа, 2004. – 383 с.
5. User's Guide. Visual Solution Incorporated.1995, 225 p.

#### References (transliterated)

1. Push V. E. *Malye peremeschenia v stankah*. [Small movements in machine tools]. Moscow, State scientific - technical publishing engineering literature., 1961, 123 p.
2. Push V. E. *Konstruirovaniye metallorezhuschih stankov* [Construction of machine tools]. Moscow, Engineering Publ., 1977. 390 p.
3. Orlikov M. L. *Dinamika stankov*. [Machine Dynamics]. – Kiev, Vishcha School Publ., 1989. – 272 p.
4. Djakonov V. P. *VisSim + Mathcad + MatLAB. Vizualnoe matematicheskoe modelirovaniye*. [VisSim + Mathcad + MatLAB. Visual mathematical modeling]. Moscow, Solon- Media School Publ., 2004. – 387 p.
5. User's Guide. Visual Solution Incorporated.1995, 225 p.

Поступила (received) 19.10.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Моделювання фрикційних автоколивань при малих переміщеннях у верстатах / Ю. А. Сизий, Е. Г. Чайка, О. М. Ушаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 13–18. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.**

**Моделирование фрикционных автоколебаний при малых перемещениях в станках / Ю. А. Сизий, Э. Г. Чайка, А. Н. Ушаков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 13–18. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0023.**

**Simulate of the friction self-excited oscillation with little travel inmashines / J. A. Sisy, E. G. Chayka, A. N. Ushakov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 5(1205). – P. 13–18. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Сизий Юрій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (066) 788-24-41; e-mail: sizy.iury@yandex.ua.

**Сизий Юрій Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; профессор кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (066) 788-24-41; e-mail: sizy.iury@yandex.ua.

**Sizy Jury Anatoliyovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (066) 788-24-41; e-mail: sizy.iury@yandex.ua.

**Чайка Едуард Григорович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (095) 134-61-22; e-mail: e-chyka@yandex.ru.

**Чайка Эдуард Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; профессор кафедры «Технология машиностроения и металлорежущие станки»; тел.: (095) 134-61-22; e-mail: e-chyka@yandex.ru.

**Chayka Eduard Grigoryevich** – Docent of Technical Sciences, (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (095) 134-61-22; e-mail: e-chyka@yandex.ru.

**Ушаков Олександр Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: parom38@yandex.ru.

**Ушаков Александр Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; доцент кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: parom38@yandex.ru.

**Ushakov Aleksandr Nikolajovych** – Docent of Technical Sciences, (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Docent at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (057) 720-66-25; e-mail: parom38@yandex.ru.

УДК 539

Э. А. СИМСОН, В. Л. ХАВИН, Д. С. ЯГУДИН

**РАЗРАБОТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПРУЖИННЫХ СТОЕК СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

У даній роботі описана схема стенду, створеного за результатами попередньо проведеного циклу досліджень на базі математичного моделювання статико-динамічного навантаження стійок. За результатами якого зробили висновок про комбінованої природі їх руйнування. На першому етапі відбувається накопичення втомних пошкоджень від стохастичних і детермінованих циклічних навантажень. На другому етапі відбувається остаточна поломка стійки в результаті випадкової квазі-статичної перевантаження (наїзду на перешкоду). Завдання стенду в максимальному ступені моделювати комбіноване навантаження стійки доводячи її до руйнування, фіксуючи кількість циклів і напруги руйнування.

**Ключові слова:** випробувальний стенд, обробка ґрунту, напружено-деформований стан, частота коливань, індивідуальна пружинна стійка, методика.

В настоящей работе описана схема стенда, созданного по результатам предварительно проведенного цикла исследований на базе математического моделирования статико-динамического нагружения стоек. По результатам которого сделали вывод о комбинированной природе их разрушения. На первом этапе происходит накопление усталостных повреждений от стохастических и детерминированных циклических нагрузок. На втором этапе происходит окончательная поломка стойки в результате случайной квази-статической перегрузки (наезда на препятствие). Задача стенда в максимальной степени моделировать комбинированное нагружение стойки доводя ее до разрушения, фиксируя количество циклов и напряжения разрушения.

**Ключевые слова:** испытательный стенд, обработка грунта, напряженно-деформированное состояние, частота колебаний, индивидуальная пружинная стойка, методика.

In this paper it is described design of the stand, which has been created according to results of the preliminary studies cycle based on mathematic simulation of staticodynamic load on the tines. According to results of simulation the conclusion on combined character of the tines destruction has been drawn. At the first stage there is a fatigue damage accumulation, caused by stochastic and cyclic deterministic loads. At the second stage there is a destruction of the tine caused by accidental quasistatistical overload (hitting the obstruction). The stand is intended to maximally simulate combined load on the tine, carrying to failure, recording the number of cycles and destruction intension.

**Keywords:** test stand, soil processing, the stress-strain state, the oscillation frequency, the individual spring rack, methodology.

**Введение.** В технологии возделывания сельскохозяйственных культур неотъемлемое место занимают ротационные дисковые орудия. Исходя из необходимых агротехнических требований, технологий подготовки почвы к посеву, а также почвенно-климатических условий выбираются те или иные дисковые орудия. Разработка новых технологий и появление более совершенных дисковых борон меняет расстановку дисковых борон и луцильников по своему назначению. В последние годы минимальная обработка почвы получает все большее распространение в отличии от интенсивной технологии и требуют проводить основную обработку на глубине 8-12см [1]. При работе в таких режимах дисковый рабочий орган испытывает сложное пространственное статическое и динамическое нагружение, которое приводит к усталостному разрушению пружинной стойки на которую он установлен [2]. Настоящая работа посвящена современному подходу к оценки долговечности индивидуальной пружинной стойки дискового рабочего органа бороны.

**Основная часть.** Исходя из проведенных исследований установлено, что при работе в тяжелых почвах существует опасность усталостного разрушения стойки при попадании ее в резонанс, в следствии перманентной сери ударов зубьев дисковых инструментов об грунт [3]. Для оценки этого явления была проведена серия расчетов по определению НДС индивидуальной пружинной стойки в статическом и динамическом режимах работы. Определен спектр собственных частот и проведен расчет вынужденных частот колебаний стойки с диском в зависимости от скоростных режимов обработки [4]. Предложена ги-

потеза заключается в том, что разрушение стойки наступает после того как динамические воздействия приводят к развитию усталостных трещин, в результате чего рабочая площадь сечения стойки уменьшается и далее наступает мгновенное разрушения в результате квазистатического нагружения или потери способности конструкции выдерживать даже стационарные рабочие напряжения. Данную гипотезу подтверждают исследования поверхности излома образцов, полученных с полевых испытаний современных дисковых борон на индивидуальных пружинных стойках.

На рис. 1 представлены картинки излома стойки на которых видны кольцевидные гладкие поверхности характерные для усталостного типа накопления повреждений, также видна зона статического разрушения на внутренней кромке стойки, возникающая при однократном нагружении.

Для определения спектра собственных частот была построена трехмерная модель индивидуальной пружинной стойки с прикрепленным к ней подшипниковым злом и диском, а также участком рамы на который она устанавливается. В качестве граничным условий было использовано жесткое защемление элемента рамы на торцевых поверхностях; установить неразрывное жесткое зацепление в зоне болтового соединения стойки и рамы; такое же зацепление задано в зонах крепления диска к подшипниковому узлу и того, в свою очередь, к стойке. В зоне контакта диска с грунтом расчет проводился исходя из двух различным граничных условий: первое - свободный край, второе - равенство нулю углов поворота диска относительно вертикальной оси.

© Э. А. Симсон, В. Л. Хавин, Д. С. Ягудин, 2016



а



б

Рис. 1– Структура излома пружинной стойки (а,б)

На рис. 2 представлена трехмерная расчетная модель узла, реализованная в конечно-элементном программном комплексе.



Рис. 2 – Расчетная модель

В таблице 1 представлены собственные частоты колебаний стойки.

Разброс обусловлен нечеткой определенностью граничных условий в зоне контакта диска с почвой.

В таблице 2 представлены частоты вынужденных колебаний, определенные исходя из геометриче-

ских размеров диска, а также количества зубьев на диске и скорости движения трактора.

Таблица 1

Номер частоты	Собственная частота
1	5-7 Гц
2	11-14 Гц
3	22-25 Гц

Таблица 2

Скорость движения трактора, км/ч	Частота зубье, Гц	ударов
8	11,2	
9	12,6	
10	14	
11	15,4	
12	16,8	
13	18,2	
14	19,6	
15	21	
16	22,4	

Видно, что на скоростях обработки ~ 8-10 км/ч существует вероятность попадания конструкции в резонанс.

С целью повышения надежности при проектировании усовершенствованных стоек предложен испытательный стенд, основной целью разработки которого является определение эксплуатационных характеристик надежности стоек.

На рис. 3 представлена принципиальная схема испытательного стенда

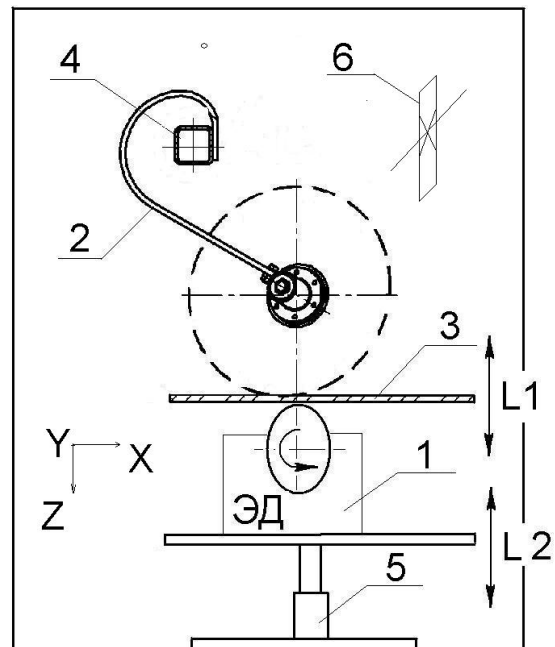


Рис. 3 – Принципиальная схема испытательного стенда: 1 - источник основных колебаний (асинхронный привод с частотным регулированием); 2 - индивидуальная пружинная стойка; 3 - вибростол основных колебаний; 4 - балка крепления стойки; 5 - привод вертикальных перемещений; 6 - вентилятор обдува.

Стенд имеет основной асинхронный привод 1 (или другой источник вынужденных колебаний стойки для имитации воздействия с грунтом лепестков «ромашки» при вращении диска) с регулированием по частоте вращения (единичных колебаний) в диапазоне от 2 Гц до 20 Гц, при поддержке ее величины с точностью  $\pm 1$  Гц от заданного номинального значения. Величина перемещения L1 точки контакта стойки 2 с вибростолом 3 привода основных колебаний 1 в вертикальной плоскости (по оси Z) по отношению к точке крепления стойки 2 к балке 4 фиксированная в процессе всего испытания (без учета перемещения вибростола в вертикальной плоскости от дополнительного привода 5) и может устанавливаться в диапазоне от 10 мм до 40 мм.

Стенд имеет дополнительный привод (как вариант — пневмоцилиндр) для перемещения привода основных колебаний с вибростолом в вертикальной плоскости по оси Z (имитация наезда диска на препятствие). Частота дополнительных перемещений постоянная в процессе испытаний и может быть установлена в диапазоне от 0 Гц до 1 Гц. Величина перемещения L2 привода основных колебаний с вибростолом по отношению к точке крепления стойки к балке постоянная в процессе всего испытания и может устанавливаться в диапазоне от 30 мм до 100 мм.

Стенд обеспечивает возможность предварительного нагружения стойки усилием 100 кг с точностью  $\pm 10\%$ . Предварительное нагружение осуществляется с помощью ручного привода (перемещение точек крепления стойки и контакта с вибростолом в вертикальной плоскости по направлению к друг другу). Величина нагружения контролируется динамометром до начала испытаний.

Для имитации боковых сил, возникающих при наезде на препятствие, стенд обеспечивает установку углов наклона вибростола:

- от  $5^\circ$  до  $35^\circ$  относительно оси Y;
- от  $5^\circ$  до  $35^\circ$  относительно оси X.

Для имитации реальных погодных условий предусмотрена возможность воздушного охлаждения стойки в процессе испытаний вентилятором обдува 6.

Специальными требованиями к стенду являются:

- конструкция стенда предусматривает постоянную регистрацию количества циклов по источнику основных колебаний
- конструкция стенда предусматривает возможность установки тензодатчиков на стойку
- управление работой стенда осуществляется дистанционно с пульта управления
- конструкция стенда обеспечивает аварийный останов стенда при изломе стойки
- стенд ремонтпригоден, его конструкция обеспечивает быстрое переоборудование для испытаний стоек различных типоразмеров
- испытательный стенд для определения гамма-процентной наработки стоек до отказа по метрологическому обеспечению соответствует ГОСТ 24555-81, по технологическому - ГОСТ 6134-87 [5-6].

Планируемые характеристики испытаний для базового процесса изображена в таблице 3.

Начальные углы наклона стола относительно осей X и Y, указанные в табл. 1, рассчитывались таким

образом, чтобы моделировать смещения в обратном направлении движению и в осевом направлении диска.

Таблица 3

Угол наклона стола по оси X	$13^\circ$
Угол наклона стола по оси Y	$10^\circ$
Предварительное нагружение стойки по оси Z, кг	100
Частота основных колебаний, Гц	12
Величина основных перемещений L1, мм	30
Частота дополнительных колебаний, Гц	0,05
Величина дополнительных перемещений L2, мм	70

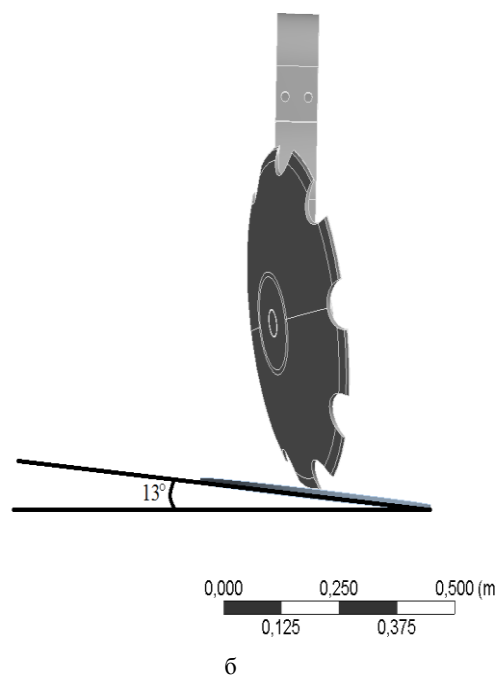
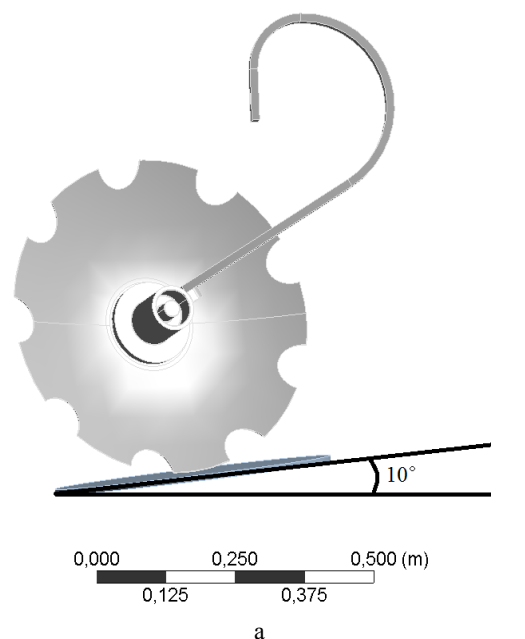


Рис. 4 – Схема для расчета углов наклона стола (а,б)

Для определения этих углов была построена трехмерная модель стола с установленным на него стойкой и диском как указано на рис. 4.

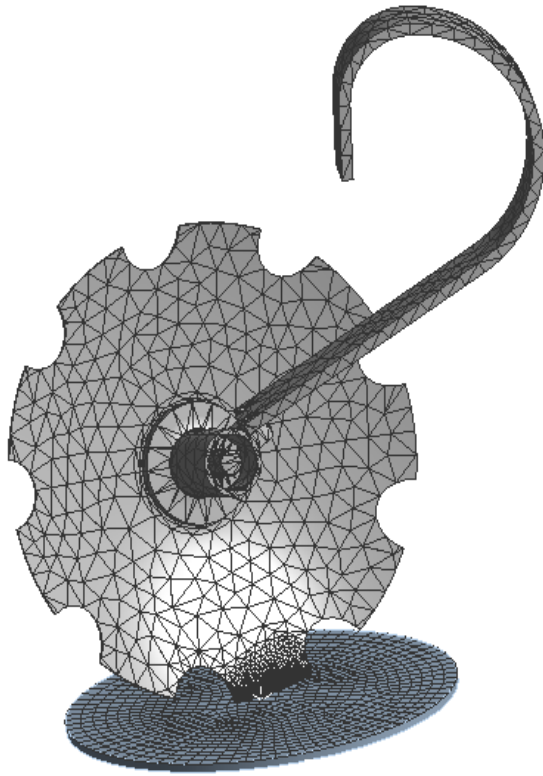


Рис. 5 – Конечно-элементная модель стойки с диском и столом

Конечно-элементная модель геометрии модели представлена на рис 5. Стойка и диск с подшипниковым узлом разбиты тетрагональными элементами, а диск, моделирующий стол, гексагональными элементами. Суммарное количество узлов равняется 96500, а количество элементов 66000.

Для моделирования реального напряженного состояния учитывается вес всей рамы, который передается на стойку, следовательно в ходе расчета стойка предварительно нагружается весом, равным 100 кг. Столу задавалось перемещение в вертикальном направлении величиной в 70 мм, при этом запрещались перемещения и повороты в остальных координатах. Величина вертикального перемещения стола выбрана исходя из среднестатистических размеров препятствий, возникающих в процессе обработки полей. Таким образом были подобраны углы, обеспечивающие такие же перемещения нижнего края стойки, как и в статических расчетах от воздействия грунта [4]. Это позволяет максимально приближенно к действительности смоделировать поведение конструкции при воздействии на нее эксплуатационных нагрузок.

## Выводы.

1. В ходе проведения исследования в данном направлении были определены основные параметры необходимые для конструирования испытательного стенда для наработки на усталостную прочность, а также их планируемые характеристики испытаний.

2. Предложенная схема испытательного стенда позволяет наработать на отказ необходимое количество стоек любых типоразмеров, при этом определить напряженно-деформированное состояние в процессе испытаний и в момент разрушения.

3. Такой подход дает возможность приступать к натурным полевым испытаниям стоек в поле с уже отработанной геометрией стойки, с подобранными оптимальными ее размерами.

4. Это существенно снижает ресурсозатраты при усовершенствовании конструкций различных типов индивидуальных пружинных стоек

## Список литературы

1. Сохт К. А. Димсковые бороны и лущильники. Проектирование технологических параметров / К. А. Сохт, Е. И. Трубилин, В. И. Коновалов. – Краснодар: Типография государственного аграрного университета, 2014. – 164 с.
2. Стрельбицкий В. Ф. Силовые характеристики рабочих органов дисковых лущильников и борон / В. Ф. Стрельбицкий //Тракторы и сельхозмашины - 1968. - № 1, с. 30-33.
3. Слободюк А. П. Предотвращение разрушения упругой стойки рабочего органа дискатора / А. П. Слободюк // Инновации в АПК: проблемы и перспективы: теоретический и научно-практический журнал. - 2014. - № 2. - С. 27-41. .
4. Э. А. Симсон. Исследование НДС дисковой бороны на индивидуальной пружинной стойке / Э. А. Симсон, Д. С. Ягудин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 26 (1198). – С. 68–70. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-9130.
5. ГОСТ 24555-81. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 1987. – 9 с.
6. ГОСТ 6134-87. Насосы динамические. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1990. - 56 с.

## References (transliterated)

1. Soht K. A. Dimskovyie boronyi i luschilniki. Proektirovanie tehnologicheskikh parametrov / K. A. Soht, E. I. Trubilin, V. I. Konovalov. – Krasnograd : Tipografiya gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2014. – 164 p.
2. Strelbitskiy V. F. Silovyye harakteristiki rabochih organov diskovyih luschilshchikov i boron / V. F. Strelbitskiy //Traktoryi i sel'hozmashinyi - 1968. - No 1, pp. 30-33.
3. Slobodyuk A. P. Predotvrashchenie razrusheniya uprugoy stoyki rabocheho organa diskatora / A. P. Slobodyuk // Innovatsii v APK: problemyi i perspektivyyi : teoreticheskii i nauchno-prakticheskii zhurnal. - 2014. - No 2. - pp. 27-41. .
4. E. A. Simson. Issledovanie NDS diskovoy borony na individualnoy pruzhinnoy stoyke / E. A. Simson, D. S. Yagudin // Visnik NTU «HPI». Seriya: Dinamika i mitsnisl mashin. – Kharkov: NTU «HPI», 2016. – No 26 (1198). – pp. 68–70. – BblIogr.: 4 nazv. – ISSN 2078-9130.
5. GOST 24555-81. Poryadok attestatsii ispytatelnogo oborudovaniya. Osnovnyie polozheniya. M.: Izd-vo standartov, 1987. – 9 p.
6. GOST 6134-87. Nasosyi dinamicheskie. Metody ispytaniy. Moscow: Izd-vo standartov, 1990. - 56 p.

Поступила (received) 01.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Розробка випробувального стенду для індивідуальної пружної стійки сільськогосподарських машин / Е. А. Сімсон, В. Л. Хавін, Д. С. Ягудін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 19–23. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Разработка испытательного стенда для индивидуальных пружинных стоек сельскохозяйственных машин / Э.А. Симсон, В. Л. Хавин, Д. С. Ягудин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 19–23. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-0023.**

**Development of test stand for individual spring tines for agricultural machinery / E. A. Simson, V. L. Khavin, D. S. Yahudin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P. 19–23. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-0023.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Сімсон Едуард Альфредович** – доктор технічних наук, професор кафедри опору матеріалів НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: simson@upec.ua.

**Симсон Эдуард Альфредович** – доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов НТУ «ХПИ», г. Харьков; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: simson@upec.ua.

**Simson Eduard** – Doctor of Sciences (High Ph. D.) Strength of materials' Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", tel.: (057)-70-761-78; e-mail: simson@upec.ua.

**Хавін Валерій Львович** – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедрою опору матеріалів НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: VKhavin@kpi.kharkov.ua

**Хавин Валерий Львович** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов НТУ «ХПИ», г. Харьков; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: VKhavin@kpi.kharkov.ua

**Khavin Valeriy** – Doctor of engineering, Professor, Head of the department of strength of materials National technical university «Kharkov polytechnic institute», tel.: (057) 707-61-78; e-mail: VKhavin@kpi.kharkov.ua

**Ягудін Дмитро Сергійович** – аспірант кафедри опору матеріалів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: dmitriy.yagudin27@gmail.com

**Ягудин Дмитрий Сергеевич** – аспирант кафедры сопротивления материалов, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (057) 707-61-78; e-mail: dmitriy.yagudin27@gmail.com

**Yahudin Dmitriy** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student at the Department of "Strength of Materials"; tel.: (057) 707-61-78; e-mail: dmitriy.yagudin27@gmail.com

УДК 621.039.56

*С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, С.С.ГНУЧИХ, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОЗИТОВ СО СФЕРИЧЕСКИМ ТЕЛОМ**

Проведено компьютерное моделирование процесса ударного деформирования дисперсно-упрочненных композитных пластин, различной толщины, сферическим ударником. Защитные конструкции в машиностроении нуждаются в повышении ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости. Рассматривалась задача контактного динамического деформирования пластины при больших скоростях протекания процесса. Компьютерное моделирование процесса проводилось специализированным программным комплексом ANSYS. Модуль "AUTODIN" основан на применении метода конечных элементов в условиях высоких скоростей и метода сглаженных частиц SPH. Анализ полученных данных показал высокую ударную прочность дисперсных композитных пластин.

**Ключові слова:** математическое моделирование, дисперсные композиты, метод сглаженных частиц SPH.

Проведено комп'ютерне моделювання процесу ударного деформування дисперсно-зміцнених композитних пластин, різної товщини, сферичним ударником. Захисні конструкції в машинобудуванні потребують підвищення ударної стійкості, при одночасному зниженні матеріаломісткості. Розглядалася задача контактного динамічного деформування пластины при великих швидкостях протікання процесу. Комп'ютерне моделювання процесу проводилося спеціалізованим програмним комплексом ANSYS. Модуль "AUTODIN" заснований на застосуванні методу кінцевих елементів в умовах високих швидкостей і методу згладжених частинок SPH. Аналіз отриманих даних показав високу ударну міцність дисперсних композитних пластин.

**Ключевые слова:** математичне моделювання, дисперсні композити, метод згладжених частинок SPH.

A computer simulation of the impact deformation dispersion-strengthened composite plates of different thicknesses, spherical drummer. Protective structure in engineering need to improve impact resistance, while reducing material consumption. We consider the problem of dynamic deformation of the contact plate at high speeds process flow. The simulation was conducted specialized software ANSYS complex. Module "AUTODIN" is based on the use of finite element method in high speed and the method of smoothed SPH particles. Data analysis showed a high impact strength dispersed composite plates.

**Keywords:** mathematical modeling, particulate composites, SPH method smoothed particle.

**Введение.** В современном машиностроении защитные изделия нуждаются в повышении ударной стойкости, при одновременном снижении материалоемкости. Они применяются в деталях машин и средствах защиты. Внимание исследователей привлекает проблема, моделирования процесса взаимодействия деформируемых, многослойных пластин конечной толщины с деформируемым ударником. Несмотря на большое внимание к данной проблеме и имеющиеся в литературе работы в этой области как экспериментального, так и теоретического плана, проблема далека от полного решения.

**Целью** данной работы являлось повышение ударной стойкости изделий машиностроения за счет использования дисперсно-упрочненных металлокомпозиционных материалов. Актуальность исследования обусловлена потребностью в прогнозировании деформации и разрушения деталей машиностроения при наличии в них композиционных материалов, в качественной оценке процесса разрушения таких деталей. Модификация существующих и создание новых композиционных материалов, включающих материалы с существенно различными свойствами.

**Постановка проблемы.** В настоящей работе мы рассматривали задачи моделирования процессов высокоскоростного деформирования тонкостенной пластины из дисперсного композита, под действием ударного нагружения ударником (СФТТ) со сферической формой рабочей части. При таком воздействии мы учитывали изменение прочностных характеристик материала, при наличии больших деформаций. Для этого было использовано компьютерное проектирование и моделирование образов исследуемых объектов на базе вычислительных логических алгоритмов САЕ-модуля ANSYS.

**Материалы исследований.** Компонентами композитов являются самые разнообразные материалы – металлы, керамика, стекла, пластмассы, углерод и т.п. Известны многокомпонентные композиционные материалы – полиматричные, когда в одном материале сочетают несколько матриц, или гибридные, включающие в себя разные наполнители [1]. Наполнитель определяет прочность, жесткость и деформируемость материала, а матрица обеспечивает монолитность материала, передачу напряжения в наполнителе и стойкость к различным внешним воздействиям.

Армирование дисперсных композитов происходит за счет включения в матрицу части другого материала. Армирующие частицы могут иметь произвольную геометрию, однако обычно предпочитают сферические, эллиптические, полиэдральные или сложные формы частиц, примеры иллюстрируются на рис.1.

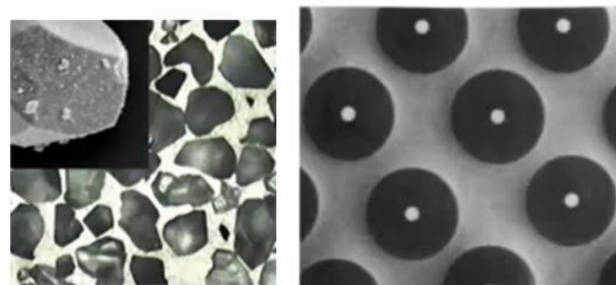


Рис. 1. – Виды дисперсных композитов

Микроструктура этих композиционных материалов характеризуется тем, что матрицу наполняют частицами армирующего вещества, а различаются они

© С.С. Добротворский, С.С.Гнучих, Л.Г. Добровольская, 2016



размерами частиц. В композитах, упрочненных частицами, их размер больше 1 мкм, а содержание составляет 20–25% (по объему), тогда как дисперсно-упрочненные композиты включают в себя от 1 до 15% (по объему) частиц размером от 0,01 до 0,1 мкм. Размеры частиц, входящих в состав нанокompозитов – нового класса композиционных материалов – еще меньше и составляют 10–100 нм.

Математическую модель, используемую в решателях ANSYSa, можно описать как задачу минимизации функционала энергии, или как решение вариационных уравнений равновесия [2]. Удельную потенциальную энергию деформации для единицы объема упругого тела, который направлен вдоль произвольно выбранной декартовой системы координат  $x, y, z$ , можно записать как:

$$W = \frac{1}{2} (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \varepsilon_{zz} + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) \quad (1)$$

Введем вектор напряжений  $\{\sigma\}$  и вектор деформаций  $\{\varepsilon\}$

$$\begin{aligned} \{\sigma\}^T &= \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\}, \\ \{\varepsilon\}^T &= \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Тогда выражение (2.1) переписывается в виде:

$$W = \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} = \frac{1}{2} \{\sigma\}^T \{\varepsilon\}. \quad (3)$$

Накопленная телом потенциальная энергия деформации определяется как интеграл по всему объему тела  $V$ :

$$U = \iiint_V W dV = \frac{1}{2} \iiint_V \{\sigma\}^T \{\varepsilon\} dV. \quad (4)$$

Закон Гука можно записать через матрицу упругих постоянных  $[D]$  в матричном виде:

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\}. \quad (5)$$

Поэтому потенциальную энергию деформации запишем в виде:

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV. \quad (6)$$

Работу внешних сил так же можно записать в матричном виде. Введем для этого вектор перемещений:

$$\{\varrho\}^T = \{u, v, w\}, \quad (7)$$

где  $u, v, w$  - проекции вектора перемещений вдоль осей  $x, y, z$ .

Вектор массовых сил  $\{Q\}$

$$\{Q\}^T = \{Q^{(x)}, Q^{(y)}, Q^{(z)}\}. \quad (8)$$

Вектор поверхностных сил  $\{P\}$ , который действует на части поверхности  $S_\sigma$ ,

$$\{P\}^T = \{P^{(x)}, P^{(y)}, P^{(z)}\} \quad (9)$$

С помощью введенных величин работа внешних сил запишется как:

$$A = \iiint_V \{Q\}^T \{\varrho\} dV + \iint_{S_\sigma} \{P\}^T \{\varrho\} dS. \quad (10)$$

Известно, что полная энергия системы определяется как:

$$L = U - A, \quad (11)$$

Окончательное выражение получим с учетом (6) и (10):

$$L = \frac{1}{2} \iiint_V \{\varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} dV - \iiint_V \{Q\}^T \{\varrho\} dV - \iint_{S_\sigma} \{P\}^T \{\varrho\} dS. \quad (12)$$

Согласно общим теоремам механики, истинное состояние равновесия тела соответствует минимуму полной энергии, иначе говоря, задача сводится к нахождению векторов  $\{\varrho\}$  и  $\{\varepsilon\}$ ,  $\{\sigma\}$ , которые дают  $\min L$ . В данной вариационной задаче уравнениями Эйлера являются статические граничные условия и уравнения равновесия [2].

Эти закономерности и лежат в основе решателя AUTODYN. Для описания поведения дисперсной керамики будем использовать идеальную упруго - пластическую модель прочности Drucker-Prager [3] с параметрами представленными в таблице 1. Основа задавалась Aluminum Alloy. Для СФТТ задавался STEEL4340.

Таблица 1–Керамика по модели Drucker-Prager

Properties	Value	Size
Reference Density	3,43	g/cm <sup>3</sup>
Bulk Modulus	1.54e+08	kPa
Reference Temperature	300	K
Drucker-Prager		
Shear modukus	8.3e+07	kPa
Pressure 1	-5.0e+05	kPa
Pressure 2	0	kPa
Pressure 3	1.01e+20	kPa
Pressure 4	1.01e+20	kPa
Yield Stress 1	0	kPa
Yield Stress 2	3.8e+06	kPa
Yield Stress 3	3.8e+06	kPa
Yield Stress 4	3.8e+06	kPa
Cumulative Damage		
Eff/ 0Damage	Pl. Strain at	0.01
Eff/ MaxDamage	Pl. Strain at	0.03
Maximum Damage		0.7

Для моделирования керамики использовался бессеточный Лагранжевый метод (метод сглаженных частиц SPH) [4]. Эти решатели представляют наиболее точный и эффективный метод расчета нелинейных задач динамического нагружения конструкций. Однако в случаях больших деформаций, которые мы наблюдаем при моделировании керамики, данный метод может привести к чрезмерному искажению расчетной сетки, потере точности и разрушения численного решения. Именно поэтому для расчета деформаций и разрушения керамики использовался бессеточный Лагранжевый метод. Этот метод обеспечивает надежное решение для задач высокоскоростного взаимодействия и фрагментации хрупких материалов [5-6]. Данный метод позволяет производить расчеты при больших деформациях при сохранении преимуществ Лагранжевого подхода. Однако данный метод

требует более высоких затрат компьютерного времени. Пластина, была заполнена частицами с характерными размерами 0.05мм. Пластины заполнены более 50000 элементами, этот параметр варьировался в зависимости от размера пластины.

На модель воздействовало СФТТ со скоростью 700м/с. Пластина фиксировалась Flexid Support по контуру. Общее время расчета составлялось 0,05 сек.

**Результаты исследования.** В результате исследований были получены данные представленные на рисунке 2-5. Анализ полученных результатов показал, что пластины с дисперсным наполнителем менее подвержены разрушению, при ударном взаимодействии. И при аналогичных начальных условиях выдерживают удар при меньших толщинах, что экономит вес и габариты изделий.

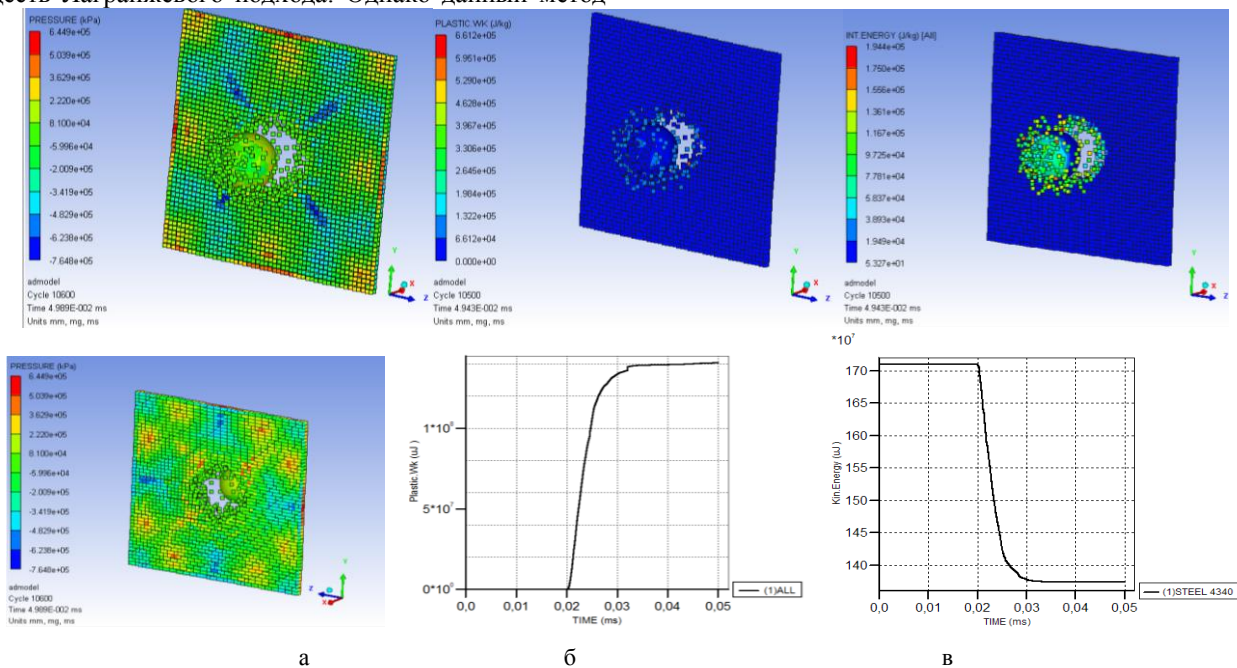


Рис. 2 – Дисперсно-армированная композитная пластина толщиной 1 мм: а – распределение давления, б – распределение Plastic.wk, в – распределение энергии

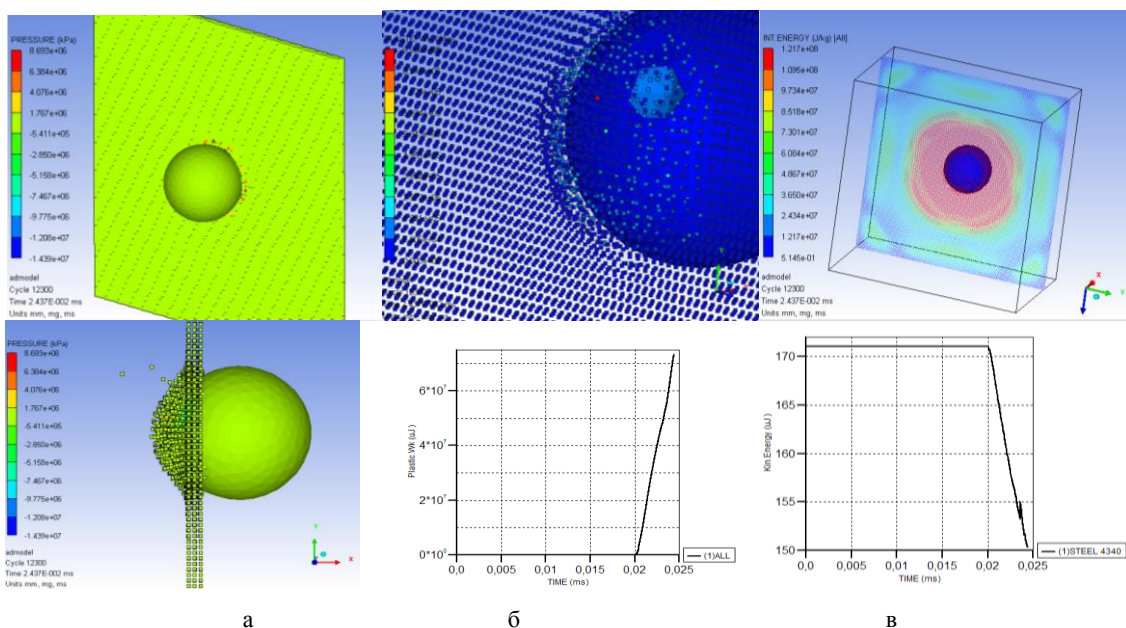


Рис. 3 – Дисперсно-армированная композитная пластина толщиной 1.5 мм: а – распределение давления, б – распределение Plastic.wk, в – распределение энергии

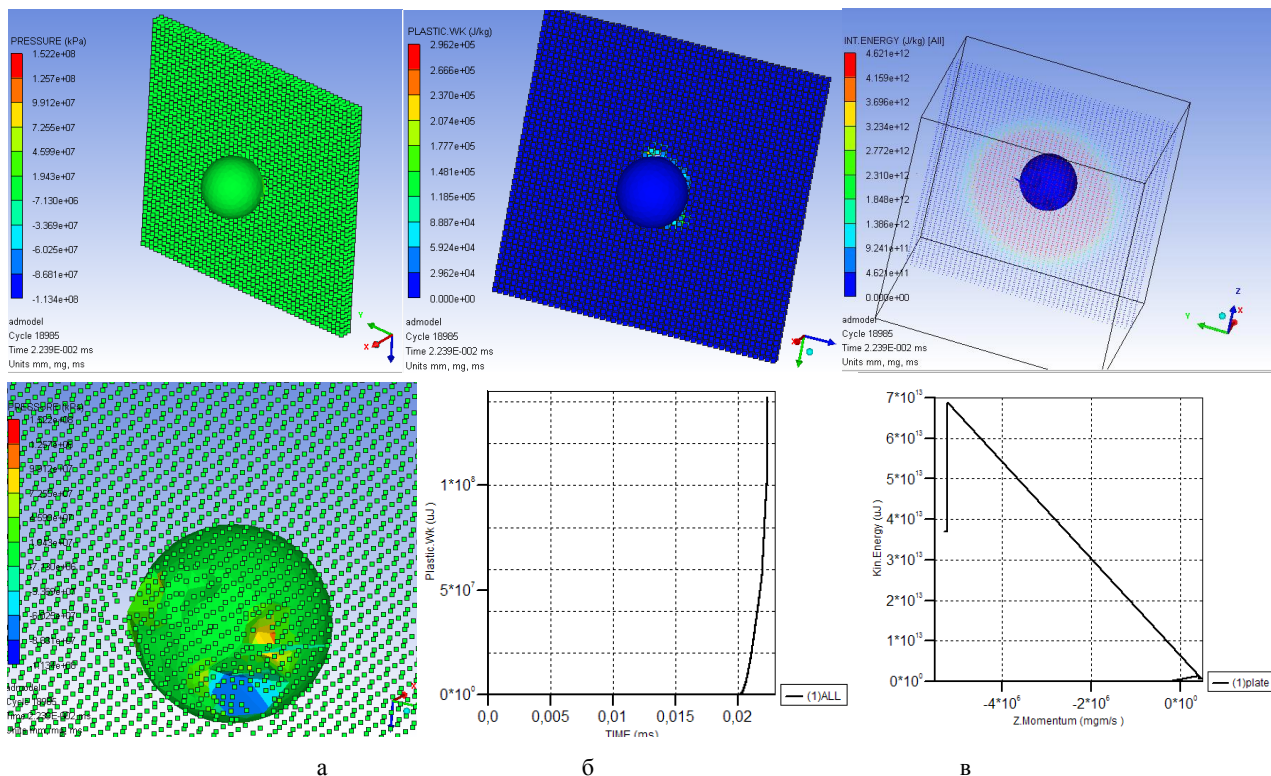


Рис. 4 – Дисперсно-армированная композитная пластина толщиной 3 мм:  
 а – распределение давления, б – распределение Plastic.wk, в – распределение энергии

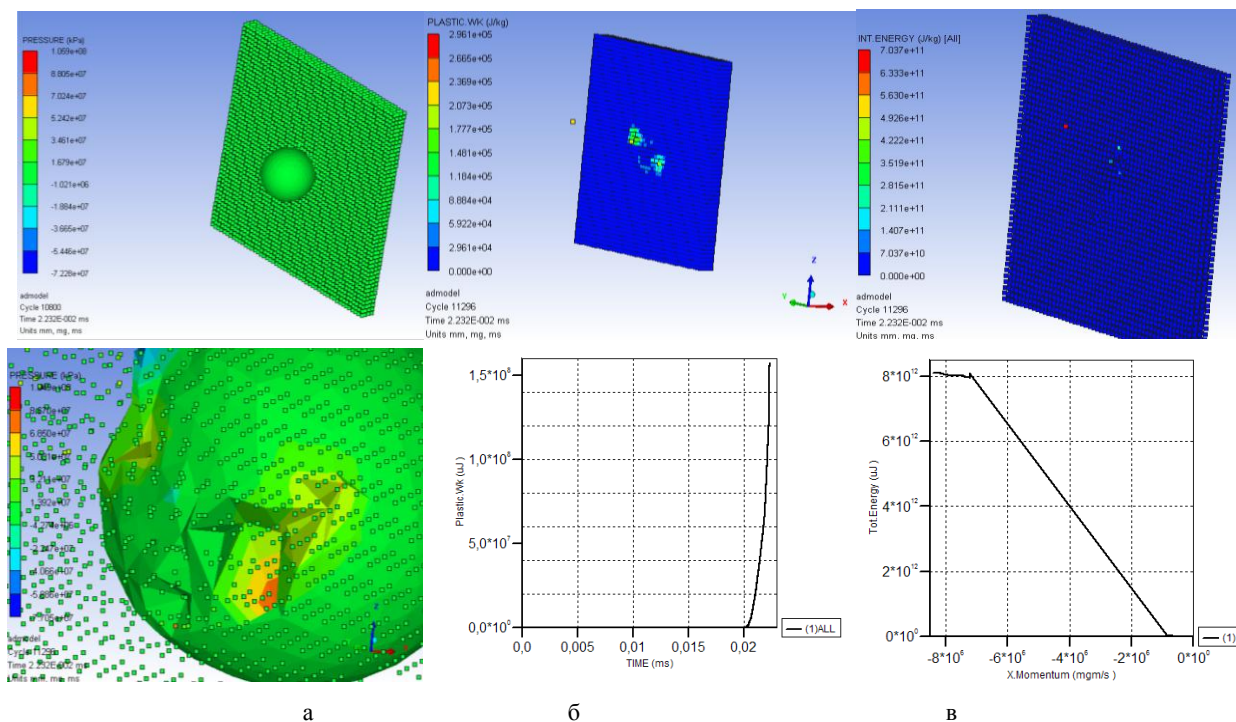


Рис. 5 – Дисперсно-армированная композитная пластина толщиной 4 мм.  
 а – распределение давления, б – распределение Plastic.wk, в – распределение энергии

**Выводы.** В ходе работы был разработан алгоритм инженерных расчетов процесса высокоскоростного ударного взаимодействия дисперсно-упрочненных пластин со сферическим ударником. Рассмотрены результаты численного моделирования высокоскоростного ударного взаимодействия СФТТ и пластины. Получены зависимости распределения да-

вления, plastic.wk, энергии в пластинах различной толщины.

Для моделирования ударного взаимодействия СФТТ и пластины с дисперсными включениями был использован бессеточный Лагранжевый метод, реализованный в подсистеме AUTODYN. Достоверность полученных результатов обеспечивается: корректностью постановок задач, выбором в каждом

конкретном случае адекватной расчетной сетки, обеспечивающей сходимость решения, контролем в процессе численного счета выполнения законов сохранения.

Результаты моделирования позволяют сделать заключение, что пластины с дисперсным наполнителем менее подвержены разрушению, при ударном взаимодействии. И в аналогичных начальных условиях выдерживают удар при меньших толщинах, что экономит вес и габариты изделий.

#### Список литературы

1. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. - СПб.: Научные основы и технологии, 2008. - 660 с.
2. Бате Н., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. - М.: Стройиздат, 1982. - 448 с.
3. Russell J., Cohn R. Drucker-Prager yield criterion. - 978-5-5146-7452-7, 2013. -102 p.
4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимации. - М.: Мир, 1986. - 460 с.
5. Ravid M., Bodner S.R., Chochron I.S. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. - Interlaken, Switzerland, 2001.
6. Добротворський С. С. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей / С. С. Добротворський, Є. В. Басова та ін.

// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: збірник наукових праць. - 2015. - № 822. - С. 7-13.

#### Bibliography (transliterated)

1. Михайлин Ю.А. Spetsial'nyye polimernyye kompozitsionnyye materialy. - SPb.: Nauchnyye osnovy i tekhnologii, 2008. - 660 p.
2. Bate N., Vil'son E. Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov. - M.: Stroyizdat, 1982. - 448 p.
3. Russell J., Cohn R. Drucker-Prager yield criterion. - 978-5-5146-7452-7, 2013. -102 p.
4. Zenkevich O., Morgan K. Konechnyye elementy i approksimatsii. - M.: Mir, 1986. - 460 p.
5. Ravid M., Bodner S.R., Chochron I.S. Penetration analysis of ceramic armor with composite material backing // Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Ballistics. - Interlaken, Switzerland, 2001.
6. Dobrotvorsky S.S., Basova E.V., et al. Komp'yuternye proektuvannya ta modelyuvannya texnologichny'x procesiv vy sokoshvy'dkiskogo frezeruvannya zagartovany'x [Computer design and simulation processes high-speed milling hardened steels] *Visnyk Nacional'nogo universytetu «Lviv'ska politexnika». Seriya: Optymizatsiya vyrobny'chy'x procesiv i texnichny'j kontrol' u mashynobuduvanni ta pry-ladobuduvanni : zbirnyk naukovy'x prac'.* 2015. No 822. pp. 7-13.

Поступила (received) 12.09.16

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Моделирование процесса высокоскоростного соударения дисперсных композитов со сферическим телом / С.С. Добротворский, С.С.Гнучих, Добровольская Л.Г.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. - Х.: НТУ «ХПІ», 2016. - № 33 (1205) - С. 24-28. - Бібліогр.: 6 назв. - ISSN 2079-004X.

**Моделювання процесу високошвидкісного зіткнення дисперсних композитів зі сферичним тілом / С.С. Добротворський, С.С. Гнучіх, Л.Г. Добровольська** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. - Х.: НТУ «ХПІ», 2016. - № 33 (1205) - С. 24-28. - Бібліогр.: 6 назв. - ISSN 2079-004X.

**Simulation of the process of high-speed collision of disperse composites with a spherical body / S.S. Dobrotvorsky, S.S. Gnuchih, L.G. Dobrovolska** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. - No 33 (1205). - P. 24-28. - Bibliogr.: 7. - ISSN 2079-004X.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Добротвірської Сергій Семенович** - доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: sdbro@mail.ru.

**Добротворський Сергій Семенович** - доктор технических наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: sdbro@mail.ru.

**Dobrotvorsky Sergey Semenovich** - Doctor of Technical Sciences, Professor of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: sdbro@mail.ru.

**Гнучий Сергій Сергійович** - аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

**Гнучих Сергій Сергеевич** - аспирант Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

**Gnuchev Sergey Serhiyovych** - postgraduate of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: gny4ix@mail.ru.

**Добровольська Людмила Георгіївна** - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

**Добровольская Людмила Георгиевна** - кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

**Dobrovolska Lyudmila Georgiyevna** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

УДК 621.865.6

Г. И. КОСТЮК, О. Д. ГРИГОР

**О ВЛИЯНИИ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ОЦЕНКУ РАЗМЕРА ЗЕРНА ПРИ ДЕЙСТВИИ ИОНОВ НА ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ**

Розглянуто вплив завдання теплофізичних і термомеханічних характеристик матеріалу, при квантово - механічному підході до їх визначення на розмір зерна. Проведено порівняння результатів розрахунку за стохастичними даними і розрахунками по квантово-механічній теорії теплофізичних і термомеханічних характеристик. Показано, що при малих енергіях іонів (для легких іонів В, С, N, AL, O) існує значна відмінність між цими значеннями, тоді як зі збільшенням енергії ці відмінності істотно згладжуються. Для більш важких іонів (для Cr, V, Fe, Ni, Co, Y, Z, Mo, Hf, Ta, W, Pt) відміна зберігається як при малих, так і при високих енергіях. Ясно, що в цьому випадку необхідно обов'язково зіставляти результати розрахунку і експерименту, для того щоб визначити, для яких іонів необхідно враховувати вплив квантово-механічних ефектів, а для яких – не треба.

**Ключові слова:** квантово-механічний підхід, квантово-механічна теорія, теплофізичні та термомеханічні характеристики.

Рассмотрено влияние задания теплофизических и термомеханических характеристик материала, при квантово-механическом подходе к их определению на размер зерна. Проведено сравнение результатов расчета по стохастическим данным и расчетам по квантово-механической теории теплофизических и термомеханических характеристик. Показано, что при малых энергиях ионов (для легких ионов В, С, N, AL, O) существует значительное отличие между этими значениями, тогда как с увеличением энергии эти различия существенно сглаживаются. Для более тяжелых ионов (для Cr, V, Fe, Ni, Co, Y, Z, Mo, Hf, Ta, W, Pt) отличие сохраняется как при малых, так и при больших энергиях. Ясно, что в этом случае необходимо обязательно сопоставлять результаты расчета и эксперимента. с тем, чтобы определить, для каких ионов необходимо учитывать влияние квантово-механических эффектов, а для каких не надо.

**Ключевые слова:** квантово-механический подход, квантово-механическая теория, теплофизические и термомеханические характеристики.

The paper considers the influence of the task of thermal and thermomechanical properties of the material, with the quantum mechanical approach to their definition in the grain size. The comparison of the calculation results of the stochastic data and calculations on quantum mechanical theory of thermal and thermomechanical properties. It is shown that there is a significant difference between these values, whereas with increasing energy, these differences are considerably smoothed low-energy ions (light ions for B, C, N, AL, O). For heavier ions (for Cr, V, Fe, Ni, Co, Y, Z, Mo, Hf, Ta, W, Pt) is stored as a contrast at low and at high energies. It is clear that in this case, be sure to compare the results of calculation and experiment. In order that would determine for which ions need to consider the impact of quantum mechanical effects, and which do not.

**Keywords:** a quantum-mechanical approach, a quantum-mechanical theory, thermal and thermo-mechanical properties.

**Введение.** Применение титановых сплавов в авиационных конструкциях не получило широкого распространения, так как их поверхность имеет относительно невысокую твердость, что не позволяет их применять в ответственных конструкциях. Получение наноструктур на поверхности титановых сплавов может существенно улучшить контактную прочность, а значит – существенно, расширить сферу их применения. Все это говорит о важности рассмотрения вопроса о получении наноструктур на этих сплавах и определения технологических параметров их получения.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций», «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

**Состояние вопроса.** К сожалению, в настоящее время нет как теоретических, так и экспериментальных работ по получению наноструктур (НС) на титановых сплавах, хотя теоретическому исследованию получения наноструктур посвящены ряд наших монографий [1–5], а экспериментальные работы рассматривались в монографиях [6–11]. На основе этих работ можно сформулировать критерии образования наноструктур: достижение необходимого диапазона температур (500...1500 К), превышение скорости роста температуры  $10^7$  К/с и наличие температурных напряжений в диапазоне  $10^7...10^9$  Па. При реализации температурных напряжений, превышающих  $10^{10}$  Па, есть вероятность непосредственного получения НС.

Ограничив область пространства в детали, где реализуются эти критерии, можно найти объем зоны, где возможно получение НС при действии индивидуального иона, а далее по объему получить размер зерна. Размер зерна обычно необходим, так как практически всегда исследуется влияние размера зерна на физико-механические характеристики материалов и детали. Поэтому в работе проводим исследование влияния энергии ионов на размер зерна при квантово-механическом и стохастическом определении теплофизических и термомеханических характеристик обрабатываемого материала.

**Цель исследования.** Целью исследования было определение технологических параметров, при которых необходимо учитывать изменение теплофизических и термомеханических характеристик материала

© Г. И. Костюк, О. Д. Григор, 2016

при квантово-механическом подходе по сравнению со стохастическими их значениями.

**Расчетная модель и метод ее решения.** Решалась совместная задача теплопроводности и термоупругости с применением метода МКЕ, причем на первом полушаге определялась температура, а на втором полушаге проводились расчеты с учетом найденных температурных напряжений, что позволяло рассчитать поля температур и температурных напряжений в зоне действия индивидуальной частицы (иона), по которым находилась зона, где выполнялись критерии образования НС. В дальнейшем по объему этой зоны определялся размер зерна.

**Результаты расчета и их обсуждение.** Для случая действия ионов (В, С, N, AL, O Cr, V, Fe, Ni, Co, Y, Z, Mo, Hf, Ta, W, Pt) получены зависимости размера зерна от энергии ионов и их зарядов (1, 2, 3), которые показаны на рис. (1–17). При стохастическом определении теплофизических характеристик результаты даны на сплошных кривых, а при квантово-механическом – определении пунктирами.

На рис. 1–5 видно, что с ростом энергии ионов результаты расчетов по двум вариантам сближаются и при 20 кэВ они практически совпадают, что позволяет пользоваться стохастическим методом определения теплофизических и термомеханических характеристик.

В остальных случаях (особенно при больших зарядах ионов) необходимо знать экспериментальное значение размера зерна и в зависимости от того, к какому значению оно будет ближе применять соответствующий метод расчета.

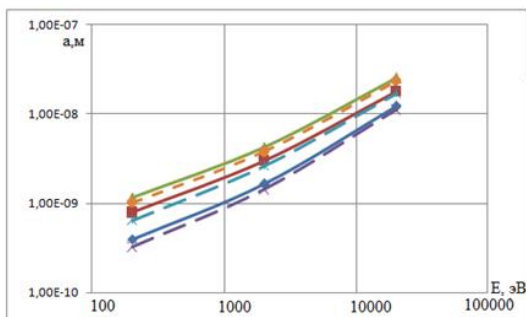


Рис. 1 – Зависимость размера зерна от энергии иона В при разных зарядах (— – теплофизические характеристики взятые из справочника, - - - - - рассчитаны по квантово-механическим теориям) для Эльбора-Р

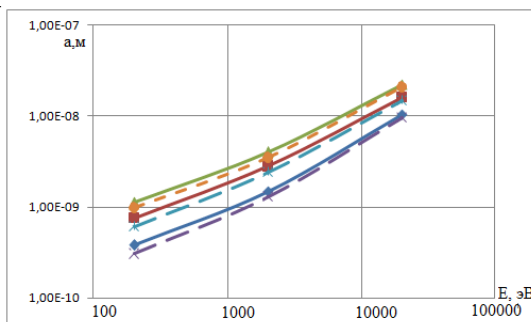


Рис. 2 – Зависимость размера зерна от энергии иона С при разных зарядах (— – теплофизические характеристики взятые из справочника, - - - - - рассчитанные по квантово-механическим теориям) для Эльбора-Р

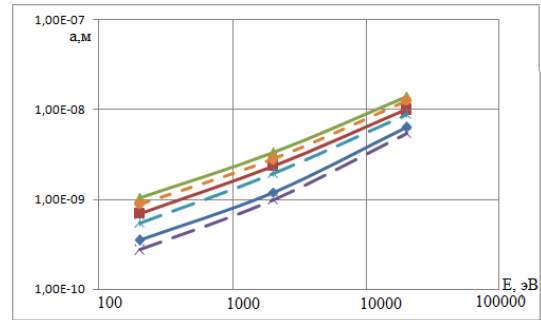


Рис. 3 – Зависимость размера зерна от энергии иона N при разных зарядах (— – теплофизические характеристики взятые из справочника, - - - - - рассчитанные по квантово-механическим теориям) для Эльбора-Р

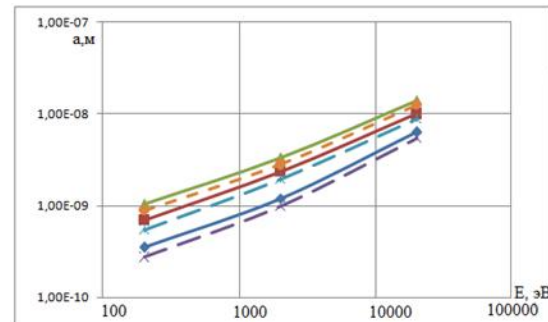


Рис. 4 – Зависимость размера зерна от энергии иона Al при разных зарядах (— – теплофизические характеристики взятые из справочника, - - - - - рассчитаны по квантово-механическим теориям) для Эльбора-Р

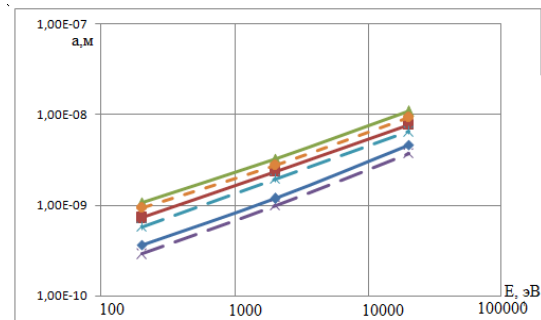


Рис. 5 – Зависимость размера зерна от энергии иона V при разных зарядах (— – теплофизические характеристики взятые из справочника, - - - - - рассчитаны по квантово-механическим теориям) для Эльбора-Р

Для исследованного диапазона энергий (200...20000 эВ) с ростом энергии растет размер зерна, причем при стохастическом определении теплофизических и термомеханических характеристик получают большие значения.

При повышении массы ионов (Cr, V, Fe, Ni, Co, Y, Z, Mo, Hf, Ta, W, Pt) стохастическое значение и квантово-механический подход дают эквидистантные кривые практически для всего диапазона исследованных энергий (200...20000 эВ). Необходимо нормировать значение по экспериментальным данным хотя бы в одной из точек по энергии иона и его заряду, что позволит определить, к какой кривой приближаются эти значения, а, следовательно, и будут более точные величины размера зерна (рис 6–17).

Для исследованного диапазона энергий (200...20000 эВ) с ростом энергии растет и размер

зерна, причем при стохастическом определении теплофизических и термомеханических характеристик получаются большие значения.

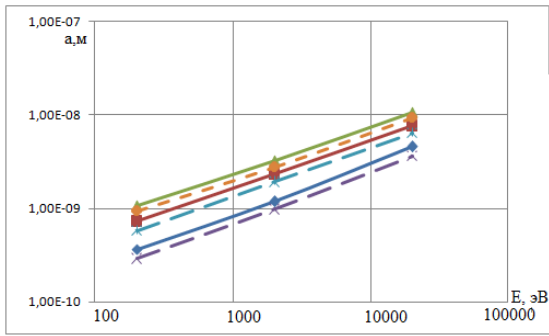


Рис. 6 – Зависимость размера зерна от энергии иона Sr при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантовомеханическим теориям) для Эльбора-Р

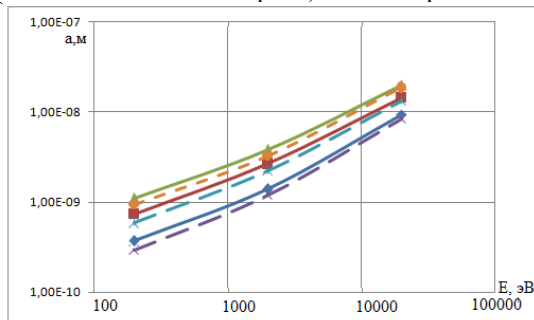


Рис. 7 – Зависимость размера зерна от энергии иона O при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантовомеханическим теориям) для Эльбора-Р

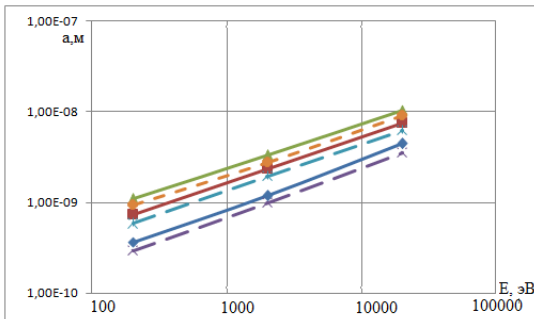


Рис. 8 – Зависимость размера зерна от энергии иона Fe при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантовомеханическим теориям) для Эльбора-Р

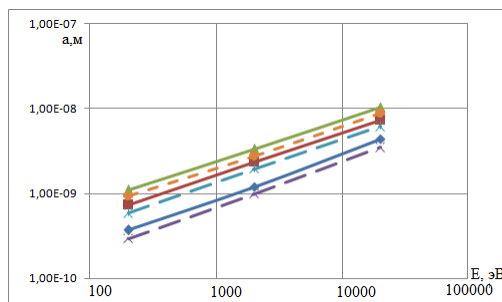


Рис. 9 – Зависимость размера зерна от энергии иона Ni при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантовомеханическим теориям) для Эльбора-Р

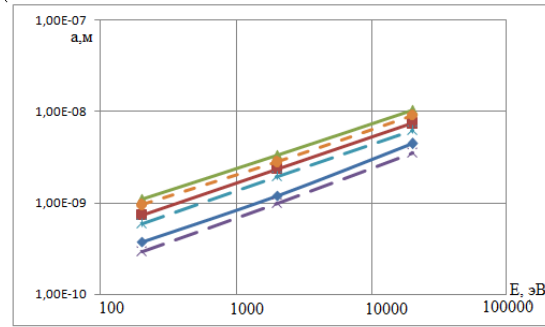


Рис. 10 – Зависимость размера зерна от энергии иона Co при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантовомеханическим теориям) для Эльбора-Р

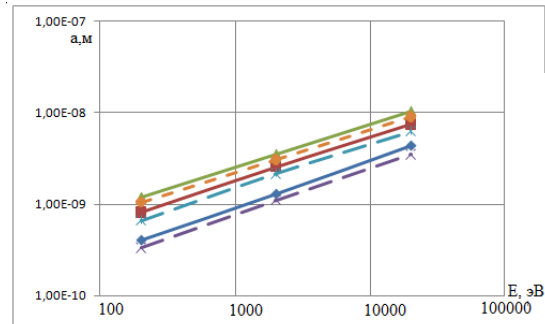


Рис. 11 – Зависимость размера зерна от энергии иона Y при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантовомеханическим теориям) для Эльбора-Р

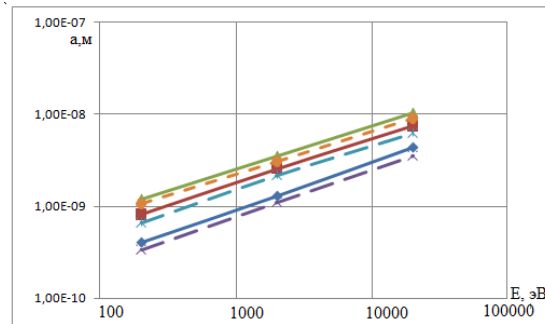


Рис. 12 – Зависимость размера зерна от энергии иона Cr при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантовомеханическим теориям) для Эльбора-Р

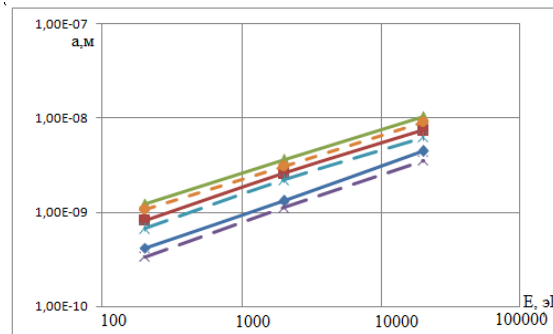


Рис. 13 – Зависимость размера зерна от энергии иона Mo при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитаны по квантовомеханическим теориям) для Эльбора-Р

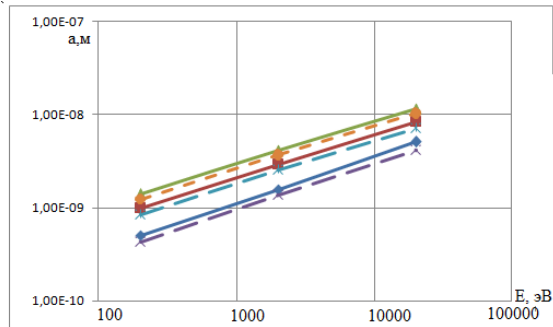


Рис. 14 – Зависимость размера зерна от энергии иона Hf при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантово-механическим теориям) для Эльбора-Р

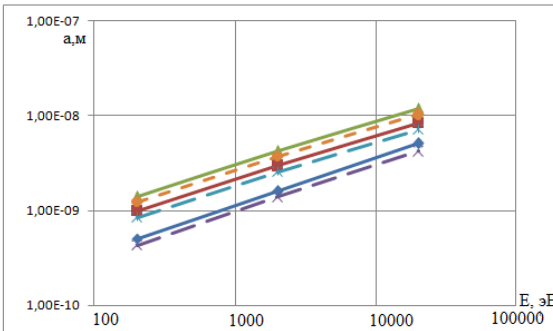


Рис. 15 – Зависимость размера зерна от энергии иона Ta при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантово-механическим теориям) для Эльбора-Р

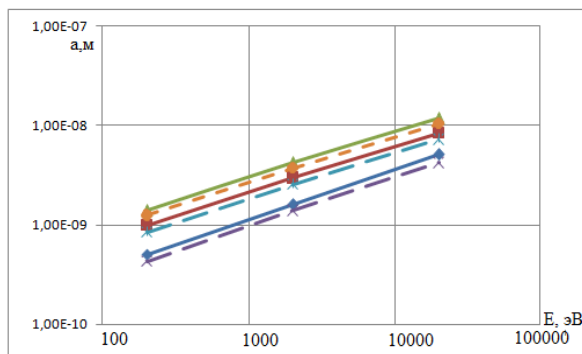


Рис. 16 – Зависимость размера зерна от энергии иона W при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантово-механическим теориям) для Эльбора-Р

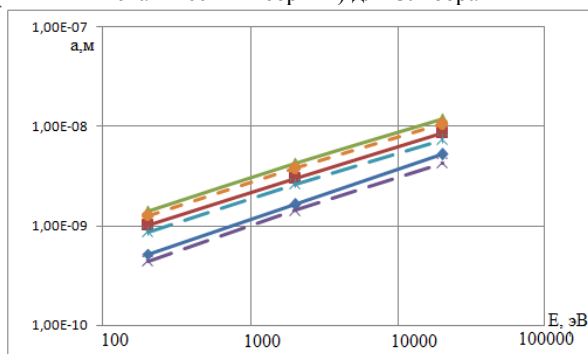


Рис. 17 – Зависимость размера зерна от энергии иона Pt при разных зарядах (— — теплофизические характеристики, взятые из справочника, - - - - рассчитанные по квантово-механическим теориям) для Эльбора-Р

## Выводы.

Проведенные исследования показали, что с ростом энергии иона растет размер зерна, при этом для случая стохастического определения теплофизических и термомеханических характеристик эти значения имеют большие величины.

Показано, что для случая действия легких ионов (В, С, N, Al, O) с ростом энергии кривые по двум вариантам задания теплофизических и термомеханических характеристик сближаются и при 20 КэВ практически совпадают, что позволяет при высоких энергиях этих ионов не учитывать квантово-механический подход к определению характеристик.

Для тяжелых ионов (Cr, V, Fe, Ni, Co, Y, Z, Mo, Hf, Ta, W, Pt) практически для всех исследованных энергий отличие результатов остается, тогда в этом случае необходимо нормировать величины значения размера зерна по результатам эксперимента. В зависимости от того, к какой кривой эти результаты ближе, выбирать тот или иной метод расчета.

Для исследованного диапазона энергий (200...20000 эВ) с ростом энергии растет и размер зерна, причем при стохастическом определении теплофизических и термомеханических характеристик получаются большие значения.

## Список литературы

1. Костюк Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
2. Костюк Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
3. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с.
4. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.
5. Костюк Г. И. Наноструктуры и нанопокртия: перспективы и реальность: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
6. Костюк Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
7. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
8. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.
9. Костюк Г. И. Физико-технические основы роботизированного производства: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.
10. Гречихин Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
11. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
12. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.



## Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur*: monogr [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
3. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, plazmennyykh, svetoluchevyykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevyykh, plazmennyykh, svetoluchevyykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. 596 p.
4. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Reference for calculation of the main physical and technological parameters, assessing opportunities, selecting the type of technologies and equipment]. 482 p.
5. Kostyuk, G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
6. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy: ucheb.posobiye* [The scientific basis for the creation of modern technologies] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2008. 552 p.
7. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
8. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, AINU, 2003. 412 p.
9. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva* [Physical and technical bases of robotized production] – Kharkov, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2006. – 614 p.
10. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologiy* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
11. Aksenov, I. I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy* [Vacuum arc erosion plasma sources] – Kharkiv, NII «KHFTI», 2005. 211 p.
12. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.

Поступила (received) 03.11.16

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Про вплив квантово-механічного методу визначення теплофізичних і термомеханічної характеристик на оцінку розміру зерна при дії іонів на титанові сплави / Г. І. Костюк, О. Д. Григор // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 23–33. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-004X.**

**О влиянии квантово-механического метода определения теплофизических и термомеханических характеристик на оценку размера зерна при действии ионов на титановый сплав / Г. И. Костюк, О. Д. Григор // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 29–33. – Библиогр.: 12 назв. – ISSN 2079-004X.**

**About the influence of quantum-mechanical method of determining the thermal and thermomechanical characteristics to evaluate the grain size in action at ions titanium alloys / G. I. Kostyuk, O. D. Grigor // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P. 29–33. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-004X.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Костюк Геннадий Игоревич** – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Kostyuk Gennadiy Igorevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovskiy, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Григор Ольга Діонісовна** – студентка кафедри теоретичної механіки, машинознавства і роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків; тел.: (057) 788-42-06; e-mail: gennadiykostuk206@gmail.com

**Григор Ольга Дионисовна** – студентка кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков; тел.: (057) 788-42-06; e-mail: gennadiykostuk206@gmail.com

**Grigor Olga Dionisovna** – student at the Department of Theoretical Mechanics, Mechanical Engineering and Robotic-Mechanical systems, the National Aerospace University named by N. E. Zhukovskiy «Kharkov aviation institutes», Kharkov; tel.: (057) 788-42-06; gennadiykostuk206@gmail.com

УДК 621.923

**Ю.Д. ФИЛАТОВ, В.А. КОВАЛЕВ, О.Я. ЮРЧИШИН****ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ**

Метою роботи є дослідження впливу кінематичних параметрів налагодження верстату на точність формоутворення плоских поверхонь деталей електронної техніки та оптичних систем з кристалічного кварцу при поліруванні, а також визначення їх найбільш доцільних значень, за яких досягається необхідна точність геометричної форми полірованих поверхонь. В результаті дослідження вивчено закон омірності утворення форми оброблюваної плоскої поверхні прецизійної оптичної деталі в процесі полірування. На основі узагальненої фізико-статистичної моделі утворення та видалення частинок шламу, а також методу усереднення відносної швидкості переміщення інструмента і деталі отримані залежності зміни оброблюваного матеріалу, що характеризують еволюцію форми полірованої поверхні та величину відхилення від площинності. Визначено найбільш доцільні значення кінематичних параметрів, за яких підвищується точність формоутворення.

**Ключові слова:** полірування, точність форми, відхилення від площинності.

Целью работы является исследование влияния кинематических параметров настройки станка на точность формообразования плоских поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из кристаллического кварца при полировании, а также определение их наиболее рациональных значений, при которых достигается требуемая точность геометрической формы полированных поверхностей. В результате исследования изучены закономерности формообразования обрабатываемой плоской поверхности прецизионной оптической детали в процессе полирования. На основе обобщенной физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама, а также метода усреднения относительной скорости перемещения инструмента и детали изучены зависимости съема обрабатываемого материала, характеризующие эволюцию формы полированной поверхности и величину отклонения от плоскостности. Определены наиболее целесообразные значения кинематических параметров, при которых повышается точность формообразования.

**Ключевые слова:** полирование, точность формы, отклонение от плоскостности.

The aim is to investigate the influence of kinematic machine settings on the accuracy of formation forms a flat surfaces of parts of electronic devices and optical systems of crystalline silica during polishing, as well as the determination of their most rational values for which the required accuracy is achieved by the geometrical shape of the polished surfaces. The studies examined laws of formation forms a flat surface machined of precision optical parts in the process of polishing. On the basis of the generalized physical-statistical model of the formation and removal of particles slime, and the method of averaging the relative speed of movement of the tool and workpiece are obtained depending removal of the processed material, characterizing the evolution of the shape of the polished surface and the deviation from flatness. Determined the most appropriate values of kinematic parameters for which improves the accuracy of formation.

**Keywords:** polished, form accuracy, flatness.

**Постановка проблеми.** Высокая точность формообразования прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем при полировании может быть достигнута за счет использования оптимальных кинематических и режимных параметров процесса обработки, выбора наиболее рациональной конструкции и характеристики полировальника. Моделирование процесса образования формы оптических поверхностей и применение экспериментально-теоретических методов определения показателей съема обрабатываемого материала по круговым зонам обрабатываемой поверхности и отклонения ее формы от требуемой, основаны на обобщенной физико-статистической модели образования частиц шлама и их удаления с обрабатываемой поверхности [1–4]. Формообразование поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из оптического стекла, керамики, оптических (кварц [5], сапфир [6]) и полупроводниковых (карбид кремния [7–8], нитрид галлия [9]) кристаллов осуществляется при полировании по традиционной технологии.

**Целью** исследования является изучение влияния кинематических параметров настройки станка на точность формообразования плоских поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из кристаллического кварца при полировании, а также определение их наиболее рациональных значений, при которых достигается требуемая точность геометрической формы полированных поверхностей.

Детали из кварца диаметром 60 мм полировали на шлифовально-полировальном устройстве, оснащенной системой мониторинга качества полированной поверхности, по традиционной технологии (метод жестких осей) при помощи полировального инструмента диаметром 60 мм, рабочий слой которого выполнен из 15 элементов «Аквапол» диаметром 10 мм, при следующих режимах: частота вращения детали – 800 об/мин, усилие прижима инструмента к детали – 10 Н, время цикла полирования 5–6 мин. При принудительном вращении детали (нижнее звено) инструмент (верхнее звено) вращается в том же направлении за счет сил трения между их притирающимися поверхностями, угловые скорости их вращения  $\omega_1 = 83,8 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_2 = 78,5 \text{ с}^{-1}$ , их возвратно-поступательное перемещение отсутствует (длина штриха  $L = 0$ , несимметрия штриха  $e_0 \in [2,5 \text{ мм}; 15 \text{ мм}]$ ). При полировании плоских поверхностей деталей из кварца использовался также нетрадиционный метод обработки, при котором для осуществления взаимного перемещения инструмента и детали используется не устройство станка, а эксцентричное вращение нижнего звена, за счет которого происходит изменение расстояния между их центрами.

При полировании плоских деталей из кварца по традиционной технологии (схема а, [1]) модуль вектора скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по рабочей поверхности инструмента выражается формулой

$$V_1(\rho, r, e_0) = [(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 r^2 - \omega_1 \rho^2) + \omega_1 \omega_2 e_0^2]^{1/2} \text{ (где } r -$$

© Ю.Д. Филатов, В.А. Ковалев, О.Я. Юрчишин, 2016

радиус круговых зон инструмента), а ее усредненная по  $r \in [e_0 - \rho, e_0 + \rho]$  величина в зависимости от радиуса  $\rho$  круговых зон определяется по формуле

$$u_1(\rho) = \frac{1}{2\rho} \int_{e_0-\rho}^{e_0+\rho} V_1(\rho, r, e_0) dr. \quad (1)$$

При полировании плоских поверхностей деталей из кварца при эксцентричном вращении нижнего звена (схема б, [1]) обеспечивается периодическое изменение расстояния между центрами инструмента и детали. В отличие от классического процесса формообразования радиус дуги, по которой движется центр верхнего звена по поверхности нижнего определяется эксцентриситетом  $e_1$  (расстоянием между осью вращения и геометрическим центром поверхности детали) и расстоянием  $e_2$  между осями вращения детали и инструмента. Возвратно-поступательное перемещение детали относительно поверхности инструмента характеризуется параметрами  $e_1 \in [1 \text{ мм}; 10 \text{ мм}]$  и  $e_2 \in [1 \text{ мм}; 3 \text{ мм}]$ . Модуль вектора скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности кварцевой детали по поверхности рабочего слоя инструмента выражается в соответствии с формулой

$V_2(\rho, r, e_1, e_2, \varphi) = [(\omega_2 - \omega_1)[\omega_2 r^2 - \omega_1(\rho^2 + e_1^2 + 2\rho e_1 \cos \varphi) + \omega_1 \omega_2 e_2^2]^{1/2}$ , а усредненная по  $r \in [e_2 - e_1, e_2 + e_1]$  и  $\varphi \in [0, \pi]$  относительная скорость перемещения в зависимости от радиуса  $\rho$  круговых зон определяется по формуле

$$u_2(\rho) = \frac{1}{2\pi e_1} \int_0^\pi d\varphi \int_{e_2-e_1}^{e_2+e_1} V_2(\rho, r, e_1, e_2, \varphi) dr. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены зависимости скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности детали из кварца по поверхности инструмента от радиуса круговых зон при полировании по традиционной технологии (а) и при эксцентричном вращении детали (б). При увеличении кинематических параметров  $e_0$ ,  $e_1$  и  $e_2$  величина относительной скорости для схем а и б увеличивается. При предельном переходе от схемы б к схеме а ( $e_1 \rightarrow 0$ ,  $e_2 \rightarrow e_0$ ) величина модуля скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности детали по поверхности инструмента для каждого радиуса круговых зон удовлетворяет условию:  $u_2(\rho) \rightarrow u_1(\rho)$ . Действительно, рассчитанные по формулам (1) и (2) значения скоростей в

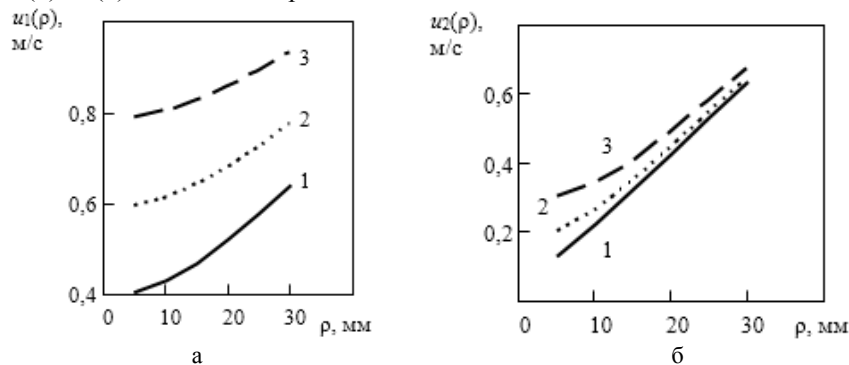


Рис. 1 – Зависимость скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по поверхности инструмента от радиуса круговых зон: а –  $e_0=2,5$  мм (1); 7,5 мм (2); 10 мм (3); б –  $e_1=1$  мм,  $e_2=1$  мм (1);  $e_1=2$  мм (2);  $e_1=10$  мм,  $e_2=3$  мм (3).

центральной зоне детали ( $\rho \rightarrow 0$ ), например при  $e_1=0$ ,  $e_2=e_0=7,5$  мм, практически совпадают  $u_2(0)=u_1(0)=0,59$  м/с.

Зависимости расчетных значений интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон детали, характерные для схем а и б, при различных параметрах настройки  $e_0$ ,  $e_1$ ,  $e_2$  приведены на рис. 2. При переходе от схемы а к схеме б ( $e_1 \rightarrow 0$ ,  $e_2 \rightarrow e_0=7,5$  мм), расчетные значения интенсивности съема обрабатываемого материала в средней зоне обрабатываемой поверхности ( $\rho=20$  мм) составляют  $Q_1=1,45 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с и  $Q_2=1,57 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/с соответственно и незначительно отличаются от экспериментально измеренных величин:  $(1,4 \pm 0,2)$  мг и  $(1,5 \pm 0,2)$  мг за время полирования 6 мин (отклонение 15%).

Монотонно возрастающие зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон детали (рис. 2) свидетельствуют о том, что форма обработанной поверхности детали – выпуклая («бугор»), а отклонение от плоскостности определяется величиной  $\delta_t = \frac{Q(D_1/2) - Q(0)}{S} t$  ( $S$  – площадь обрабатываемой поверхности,  $t$  – время полирования). Эволюция формы обработанной поверхности детали характеризуется скоростью увеличения отклонения от плоскостности во время полирования  $\delta = \delta_t/t$ .

При полировании деталей из кварца по традиционной технологии (схема а) скорость изменения неплоскостности зависит от несимметрии штриха  $e_0$  (рис. 3) и изменяется в пределах от 0,05 до 0,15 мкм/мин. За время полирования  $t=6$  мин при среднем значении  $e_0=7,5$  мм неплоскостности обработанной поверхности детали достигает величины 0,40 мкм.

При полировании деталей по схеме б скорость изменения неплоскостности обработанной поверхности зависит от кинематических параметров  $e_1$  и  $e_2$ .

При увеличении параметра  $e_1$  неплоскостность детали незначительно возрастает (рис. 4) при всех значениях  $e_2$  и изменяется в пределах от 0,054 мкм/мин (при  $e_2=1$  мм) до 0,059 мкм/мин (при  $e_2=3$  мм).

При увеличении параметра  $e_2$  скорость изменения неплоскостности обрабатываемой поверхности очень незначительно возрастает (рис. 5) при всех значениях  $e_1$  и изменяется в пределах от 0,054 мкм/мин (при  $e_1=1$  мм) до 0,059 мкм/мин (при  $e_1=10$  мм).

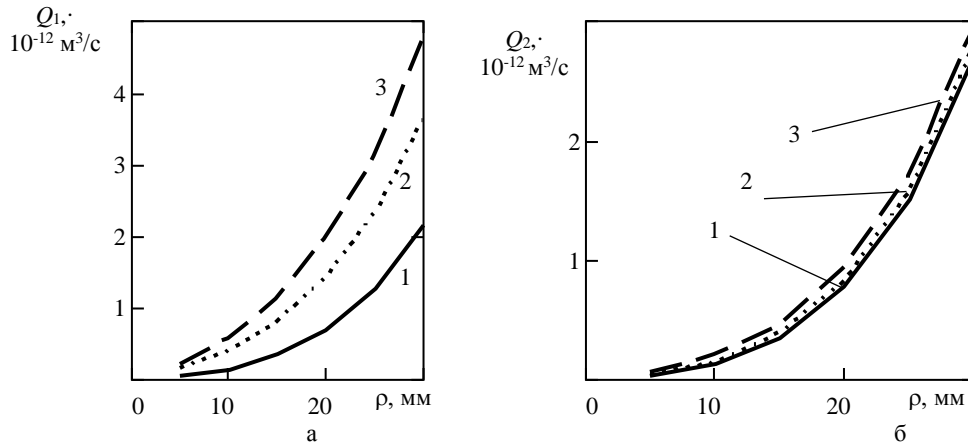


Рис. 2 – Зависимость интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности: а –  $e_0 = 2,5$  мм (1); 7,5 мм (2); 10 мм (3); б –  $e_1 = 1$  мм,  $e_2 = 1$  мм (1);  $e_1 = 5$  мм,  $e_2 = 2$  мм (2);  $e_1 = 10$  мм,  $e_2 = 3$  мм (3)

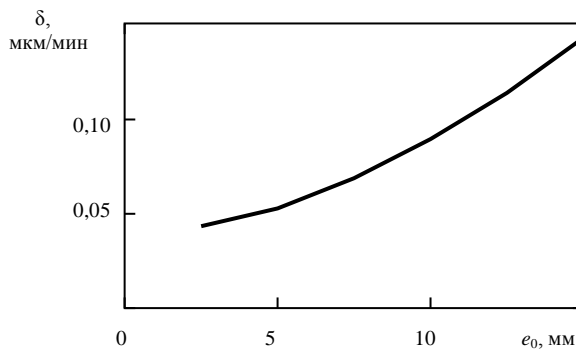


Рис. 3 – Зависимость скорости изменения неплоскостности обработанной поверхности от несимметрии штриха  $e_0$

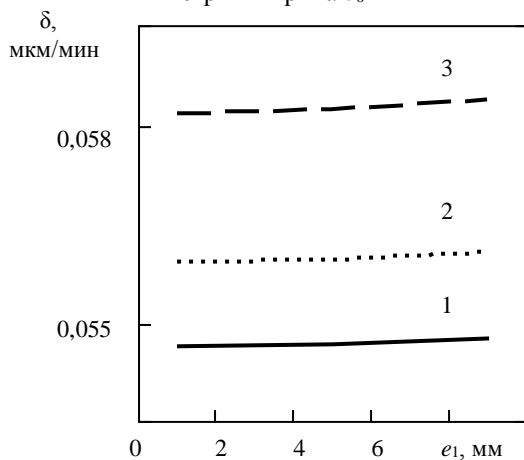


Рис. 4 – Зависимость скорости изменения неплоскостности обработанной поверхности от эксцентриситета  $e_1$ : 1 –  $e_2 = 1$  мм, 2 –  $e_2 = 2$  мм, 3 –  $e_2 = 3$  мм

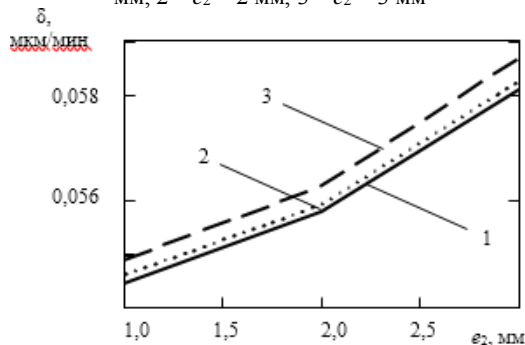


Рис. 5 – Зависимость скорости изменения неплоскостности обработанной поверхности от параметра  $e_2$ : 1 –  $e_1 = 1$  мм, 2 –  $e_1 = 5$  мм, 3 –  $e_1 = 10$  мм

За время полирования 6 мин при средних значениях кинематических параметров  $e_1 = 5,0$  мм и  $e_2 = 2,0$  мм неплоскостность обработанной поверхности детали достигает величины 0,34 мкм.

Сравнительный анализ процесса формообразования плоских поверхностей при полировании указанных деталей в описанных выше условиях показал, что точность формы обработанных поверхностей, достигаемая при использовании схем а и б, практически одинакова и оценивается величиной неплоскостности 0,3–0,4 мкм. Это позволяет обрабатывать оптические детали высокой и средней точности с плоскостностью поверхности  $N = 2$  интерференционных кольца (приблизительно 0,5 мкм). Это позволяет обрабатывать оптические детали высокой и средней точности с плоскостностью поверхности  $N = 2$  интерференционных кольца (приблизительно 0,5 мкм). Следует отметить, что для данного соотношения диаметров инструмента и обрабатываемой детали характер изменения формы обработанной поверхности (на «бугор») соответствует увеличению выпуклости независимо от кинематических параметров настройки станка. Это объясняется тем, что при принятых значениях кинематических параметров настройки использовался обычный инструмент, рабочий слой которого состоял из полировальных элементов «Аквапол» с приблизительно постоянным значением коэффициента заполнения поверхности, усугубляющий неравномерность износа. При полировании прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем, размеры которых не превышают  $D_1/3$ , в соответствии с описанной технологией точность их формообразования  $N_x \leq (1/3)^2 N \approx 0,2$  значительно повышается.

**Выводы.** Исследованы закономерности образования формы обрабатываемых плоских поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из кристаллического кварца в процессе полирования. На основе обобщенной физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама, расчета скорости относительного перемещения элементарного участка обрабатываемой поверхности по рабочей поверхности инструмента, усредненной по кинематическим параметрам, получены зависимости интенсивности съема обрабатываемого материала от радиуса круговых зон, характеризующие эволюцию формы полированной поверхности и величину отклонения от

плоскостности. Результаты исследования влияния кинематических параметров на точность геометрической формы обрабатываемой поверхности позволили определить их наиболее рациональные значения, при которых достигается требуемая точность формообразования плоских поверхностей при полировании. Результаты теоретического анализа отклонения формы поверхностей деталей электронной техники и оптических систем подтверждены экспериментальными данными.

#### Список литературы

1. Поперенко Л.В., Філатов Ю.Д. Технология обработки оптических поверхонь: Навчальний посібник для студентів фізичного факультету. – К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2004. – 166 с.
2. Філатов Ю.Д. Моделювання процесів механічної обробки матеріалів: навч. посіб. / Ю.Д. Філатов. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 176 с.
3. Vukkadala P., Turner K.T., Sinha J.K. Impact of Wafer Geometry on CMP for Advanced Nodes // J. Electrochem. Soc. – 2011. – Vol. 158. – No. 10. – P.1002–1009.
4. Lee H.S., Jeong H.D., Dornfeld D.A., Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO<sub>2</sub> chemical mechanical polishing (CMP) processes // Precision Engineering. – 2013. – Vol. 37. – P. 483–490.
5. Yaguo Li, Yongbo Wu, Libo Zhou, Masakazu Fujimoto. Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher / International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2014. – Vol. 77. – P. 93–102.
6. Budnikov A.T., Vovk E.A., Kanishchev V.N., Krivonogov S.I. Investigation of residual stresses in sapphire plates after grinding and polishing // Functional Materials. – 2012. – Vol. 19. – No. 4. – P. 478–482.
7. Golabczak M. Polishing of Hard Machining Semiconductor Materials Made of Silicon Carbide // Mechanics and Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 15. – No. 1. – P. 81–93.

8. Hui Deng, Kenji Hosoya, Yusuke Imanishi, Katsuyoshi Endo, Kazuya Yamamura. Electro-chemical mechanical polishing of single-crystal SiC using CeO<sub>2</sub> slurry // Electrochemistry Communications. – 2015. – Vol. 52. – P. 5–8.
9. Asghar K., Qasim M., and Das D. Effect of Polishing Parameters on Chemical Mechanical Planarization of C-Plane (0001) Gallium Nitride Surface Using SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Abrasives // ECS J. Solid State Sci. Technol. – 2014. – Vol. 3. – No 8. – P. 277–284.

#### References (transliterated)

1. Poperenko L., Filatov Y. (2004). *Technology of optical surfaces: A manual for students of physical faculty*. Kiev: Publishing and Printing Center "Kyiv University". p166.
2. Filatov Y. (2012). *Modeling of machining material*. Kiev: NTUU "KPI". p176.
3. Vukkadala P., Turner K., Sinha J. (2011). Impact of Wafer Geometry on CMP for Advanced Nodes. *Electrochem. Soc.* 158 (10), p1002–1009.
4. Lee H., Jeong H., Dornfeld D. (2013). Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO<sub>2</sub> chemical mechanical polishing (CMP) processes. *Precision Engineering*. 37 (-), p483–490.
5. Yaguo Li, Yongbo Wu, Libo Zhou, Masakazu Fujimoto. (2014). Vibration-assisted dry polishing of fused silica using a fixed-abrasive polisher. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 77 (-), p93–102.
6. Budnikov A., Vovk E., Kanishchev V., Krivonogov S. (2012). Investigation of residual stresses in sapphire plates after grinding and polishing. *Functional materials*. 19 (4), p478–482.
7. Golabczak M. (2011). Polishing of Hard Machining Semiconductor Materials Made of Silicon Carbide. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 15 (1), p81–93.
8. Hui Deng, Kenji Hosoya, Yusuke Imanishi, Katsuyoshi Endo, Kazuya Yamamura. (2015). , Electro-chemical mechanical polishing of single-crystal SiC using CeO<sub>2</sub> slurry. *Electrochemistry Communications*. 52 (-), p5–8.
9. Asghar K., Qasim M., Das D. (2014). Effect of Polishing Parameters on Chemical Mechanical Planarization of C-Plane (0001) Gallium Nitride Surface Using SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Abrasives. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 3 (8), p277–284.

Поступила (received) 12.11.2016

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Формоутворення плоских оптичних поверхонь при поліруванні / Ю.Д. Філатов, В.А. Ковальов, О.Я. Юрчишин** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 34–37. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

**Формообразование плоских оптических поверхностей при полировании / Ю.Д. Філатов, В.А. Ковалев, О.Я. Юрчишин** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 34–37. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

**Shaping planar optical surface during polishing / Y. Filatov, V. Kovalev, O. Yurchyshyn** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.34–37. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Філатов Юрій Данилович** – доктор технічних наук, професор, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ; тел.: (044) 379-11-09; e-mail: filatov@ism.kiev.ua.

**Філатов Юрий Данилович** – доктор технических наук, профессор, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев; тел.: (044) 379-11-09; e-mail: filatov@ism.kiev.ua..

**Filatov Yuriy** – Doctor of Sciences (High Ph. D.), V. Bakul Institute for Superhard Materials, Kyiv, tel.: (044) 379-11-09; e-mail: filatov@ism.kiev.ua.

**Ковальов Віктор Андрійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання верстатів та машин НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (044) 204-94-61; e-mail: wikkov@gmail.com

**Ковалев Виктор Андреевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования станков и машин НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (044) 204-94-61; e-mail: wikkov@gmail.com

**Kovalev Viktor** – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61; e-mail: wikkov@gmail.com.

**Юрчишин Оксана Ярославівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання верстатів та машин НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ; тел.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

**Юрчишин Оксана Ярославовна** - кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования станков и машин НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев; тел.: (044) 204-94-61; e-mail: urchyshynoks@ukr.net;

**Yurchyshyn Oksana** – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University of Ukraine «KPI», tel.: (044) 204-94-61, e-mail: urchyshynoks@ukr.net

УДК 621.9.06

*А.А. ПЕРМЯКОВ, И.Э. ЯКОВЕНКО***К ВОПРОСУ ОБ УНИФИКАЦИИ УСТАНОВОЧНО ЗАЖИМНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ АГРЕГАТИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В роботі розглянуто питання створення уніфікованих компоновальних схем установчо-затискних пристроїв спеціалізованого обладнання побудованого на принципах агрегування з метою подальшої мінімізації витрат на їх проектування та виробництво. Розробка уніфікованих компоновальних схем побудована на основі аналізу конструкцій існуючих установчо-затискних пристроїв, а також функціонального призначення структурних елементів і деталей

**Ключові слова:** агрегатоване обладнання, установчо-затискні пристрої, уніфікація, компоновка.

В работе рассмотрены вопросы создания унифицированных компоновочных схем установочно зажимных приспособлений специализированного оборудования, построенного на принципах агрегатирования с целью последующей минимизации затрат на их проектирование и производство. Разработка унифицированных компоновочных схем построена на основе анализа конструкций существующих установочно зажимных приспособлений, а также функционального назначения структурных элементов и деталей.

**Ключевые слова:** агрегатированное оборудование, установочно зажимное приспособление, унификация, компоновка.

The paper deals with the creation of the unified layout of clamping setting fixtures of specialized equipment creation based on the principles of aggregation for the purpose of minimizing their subsequent design and production costs. Development of unified layout schemes is based on the analysis of existing clamping setting fixtures structures, as well as on the functionality of the structural elements and details.

**Keywords:** aggregate equipment, mounting fixtures, unification, arrangement.

**Введение.** В современном машиностроительном производстве достаточно широко применяются различные технологические системы обработки, основанные на принципах агрегатирования (агрегатированное оборудование - АО), когда до 80% используемых узлов и элементов унифицированы. Это позволяет значительно сократить сроки создания специализированного и специального оборудования, увеличить жизненный цикл используемых компонентов за счет дальнейшего реинжиниринга и повторного использования элементов систем. Для такого оборудования установочно зажимное приспособление является одной из основных составляющих, которые определяют точность и, во многом, производительность обработки, влияют на трудоемкость проектирования и изготовления, стабильность первоначально закладываемых в технологическую систему параметров, надежность работы. Поэтому к приспособлениям АО с одной стороны предъявляются требования наивысшей эффективности и качества, а с другой, возникает необходимость обеспечить минимально возможную трудоемкость проектирования и изготовления за счет использования систем автоматизированного проектирования. Это может быть достигнуто при максимальной реализации принципов унификации в процессе разработки и производства УЗП АО.

**Анализ последних достижений и литературы.**

Теоретическим фундаментом развития исследований автоматизации проектирования приспособлений послужили работы Г.К.Горанского [1,2] в которых были сформулированы основы построения систем информационного описания объектов машиностроения и процессов их проектирования, намечены пути разработки алгоритмов решения ряда важных проектных задач. Дальнейшее развитие эти принципы нашли в работах Раковича А.Г. [3,4]

В работе [5] проведен анализ использования систем приспособлений, которые могут приспособляться к обработке других деталей, таких как УСП, СРП, УНП, СНП. Эти системы приспособлений пол-

ностью (УСП, СРП) или частично (СНП, УНП) состоят из набора стандартных, унифицированных элементов. Однако, обработка заготовок, установленных в рассмотренные типы приспособлений, на агрегатированном оборудовании ставит под вопрос обеспечение необходимой точности и производительности обработки. В работах [6, 7, 8, 9] проведена унификация УЗП для обработки однотипных деталей гидравлической арматуры на многопозиционных агрегатных станках.

Анализируя конструкторский классификатор деталей ЕСКД и технологический классификатор ЕСТПП [10], можно отметить, что их использование для унификации конструкции приспособлений для АО невозможно. Это объясняется особенностями конструкции такого оборудования и их технологического применения. Прежде всего, на агрегатированном оборудовании обрабатываются большей частью детали отраслевого, не общемашиностроительного применения. При этом оборудование и приспособления создаются для конкретного, ограниченного набора операций механической обработки конкретной заготовки. Поэтому общесоюзный классификатор деталей машиностроения в данном случае является слишком громоздким. Набор признаков, на базе которых он построен, не отвечает запросам проектировщиков при создании установочно зажимных приспособлений этой группы станков.

**Целью работы.** Целью данной статьи является анализ существующих компоновочных схем установочно зажимных приспособлений агрегатированного оборудования, выделение основных классификационных признаков, их систематизация и разработка на их основе целесообразно ограниченного множества унифицированных компоновочных схем приспособлений.

**Постановка проблемы.** Современные требования автоматизации инженерного труда и повышения эффективности создаваемых конструкций приспособлений определяют необходимость формализации,

© А.А. Пермяков, И.Э. Яковенко, 2016

как самого процесса проектирования, так и анализа их компоновочных структур и параметров.

Наиболее значительных успехов разрешения этой проблемы можно достичь только с использованием математических методов моделирования и автоматизации проектирования и изготовления приспособлений. Несмотря на то, что базовые конструкции приспособлений большинства станков и систем за длительный промежуток времени сформированы и в значительной степени устоялись, а наука об их проектировании достаточно развита в трудах многих ученых, вопросы компонетики и выбора оптимальных конструкций приспособлений исследованы недостаточно. Рассматриваемые методики проектирования приспособлений не направлены на вариантное проектирование, используя в качестве критериев эффективности только точность базирования и надежность закрепления заготовки. Недостаточная формализация процесса проектирования приспособлений объяснялась творческим характером проектирования, а предлагаемые методики определяли общие принципы и последовательность разработки конструкции на основе схем-аналогов.

#### Материалы исследований

В качестве объекта исследования были рассмотрены конструкции установочно-зажимных приспособлений (УЗП) для специального оборудования производства Харьковского завода агрегатных станков. Общей характерной чертой всех рассматриваемых приспособлений было наличие определенного набора узлов и элементов, выполняющих строго определенные функции в процессе базирования и закрепления заготовки в процессе обработки.

Для дальнейшей систематизации конструкций приспособлений необходимо выделить основные факторы, которые определяют конструкцию приспособления и компоновочную схему в целом, а также необходимость применения и конструктивные характеристики тех или иных узлов и отдельных элементов. В качестве таких факторов мы предлагаем рассмотреть функциональное назначение каждого отдельного узла приспособления, конфигурацию и геометрические параметры заготовки, предлагаемую схему ее базирования, пространственное расположение узлов и элементов приспособления относительно заготовки, параметры режимов обработки (в основном силовые).

Функциональное назначение и конфигурация заготовки определяет типы применяемых узлов и их отдельных элементов, пространственное расположение – конфигурацию образующих узел деталей, а геометрические параметры заготовки и силовые характеристики – типоразмер деталей из параметрического ряда.

В общем случае все узлы и элементы можно разделить на 5 основных групп: корпус; узел базирования; привод; узел зажима; дополнительные узлы и элементы (рис.1).

Помимо классификационных признаков УЗП, на возможность унификации и типизации элементов оказывает взаимное пространственное расположение рассматриваемых узлов и заготовки.

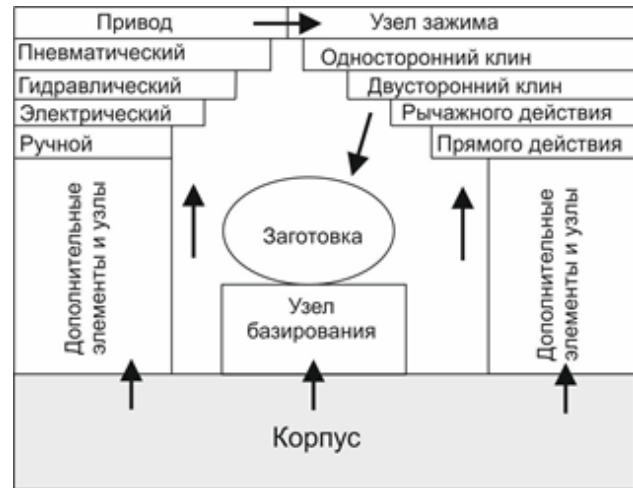


Рис. 1 – Общая компоновочная схема взаимосвязей элементов УЗП

На основе систематизации основных компоновочных схем УЗП были предложены модели компоновок, используемых в дальнейшем для синтеза вариантов приспособлений. В пределах каждой компоновочной схемы вариантность определяется характером взаимного пространственного положения привода, узла зажима и заготовки в заданной системе координат. На рис.2-7 приведены геометрические модели вариантов пространственных компоновочных схем для различных комбинаций узлов зажима и вспомогательных элементов.

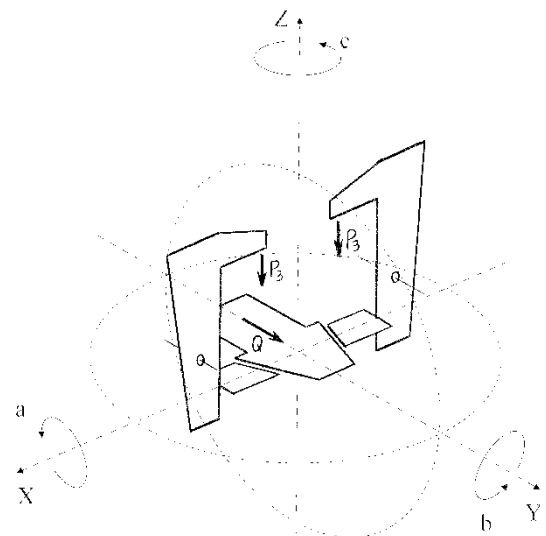


Рис.2 - С механизмом двухстороннего клина и рычагами-прихватами

Предложенная структурно-компоновочная схема легла в основу классификации УЗП и позволяет описать как приспособление в целом, так и структуру его отдельных узлов и элементов.

Каждый из рассмотренных узлов имеет свое функциональное назначение.

Корпуса – основной связующий элемент между всеми узлами и элементами УЗП.

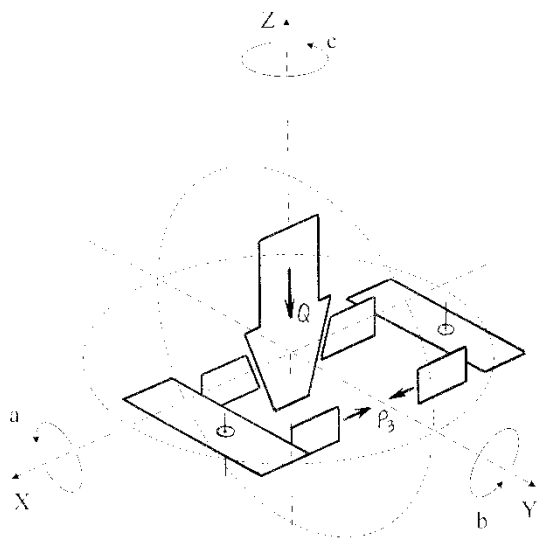


Рис. 3 - С механизмом двухстороннего клина и рычагами с ползунами

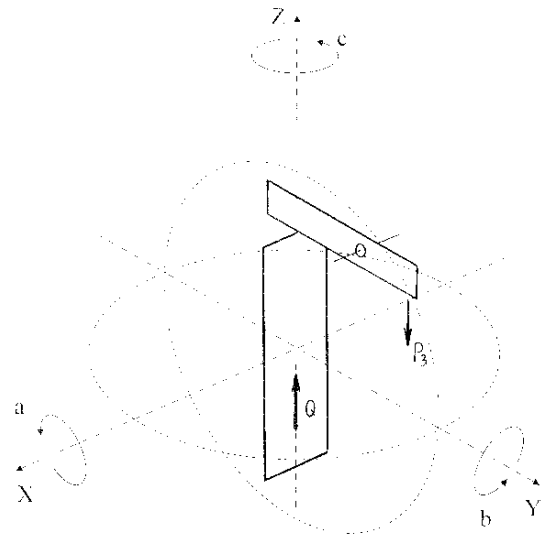


Рис. 6 – С механизмом прямого действия и рычагом

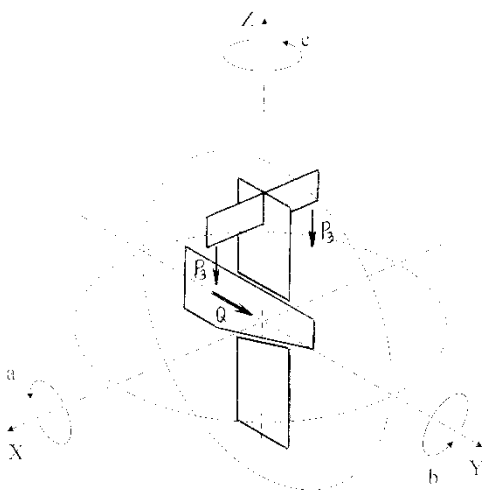


Рис. 4 - С механизмом одностороннего клина и плунжером-тяги

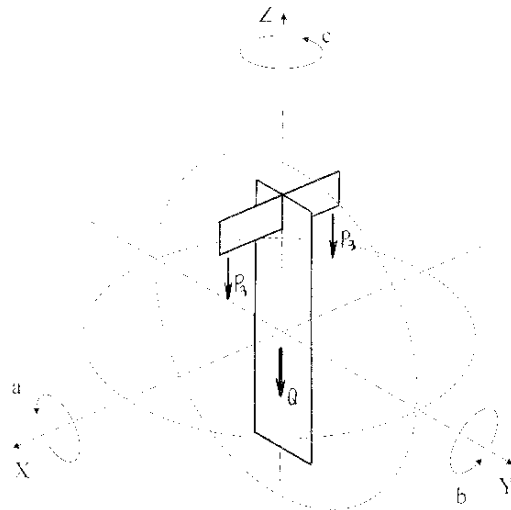


Рис. 7 - С механизмом прямого действия

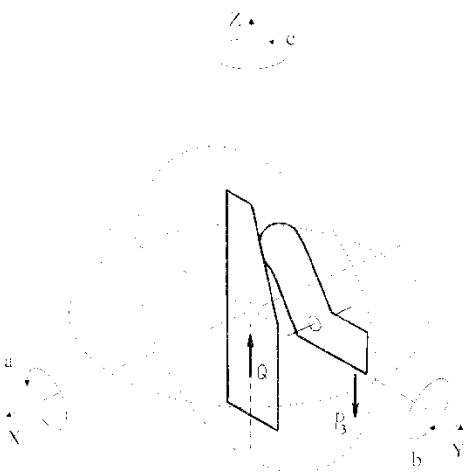


Рис. 5 - С механизмом одностороннего клина и рычагом

В большинстве своем корпус - оригинальный элемент, получаемый литьем, однако, при наличии типовых пространственных схем взаимного расположения узлов появляется возможность рассмотреть применение сборных корпусов из унифицированных деталей. Анализ компоновочных схем корпусов показал, что собственно унифицированным элементом корпуса является подошва, размеры которой регламентируются и определяются диаметром планшайбы и числом позиций поворотно-делительного стола. Конструкция же и габаритные размеры корпуса определяются типом функциональных элементов УЗП и их взаимным расположением.

Узел привода обеспечивает необходимые усилия для обеспечения закрепления заготовки. Агрегатированное оборудование работает обычно в автоматическом или полуавтоматическом режиме, поэтому наиболее распространенными являются пневматические и гидравлические приводы (более 96% использования). Для УЗП используются унифицированные пневматические и гидравлические приводы. Доста-



точно часто для минимизации габаритных размеров приспособления используются унифицированные элементы поршня и штока, а в качестве цилиндра используется оригинальная конструкция корпуса. Другие типы энергетических установок приспособления в последнее время практически не используются. Именно поэтому при проведении исследований мы рассматривали пространственные компоновочные схемы только для пневмо- и гидроприводов.

Узел зажима осуществляет пространственную связь между энергетической установкой (приводом) и заготовкой и должен обеспечивать не только необходимое усилие закрепления заготовки, но и безопасность рабочего в случае непредвиденного выхода из строя энергетической установки. Конструктивно узел зажима является наиболее насыщенным деталями и наиболее сложным в изготовлении и монтаже.

С точки зрения применимости узлов зажима, наиболее распространенными являются компоновочные схемы с клиновыми механизмами (с односторонним клином – 45%, с двусторонним клином – 29%, рычажные – 18%, прямого действия – 8%), которые обеспечивают не только достаточно высокий коэффициент полезного действия передаваемого усилия, но и обеспечивают за счет конструктивного исполнения надежное закрепление заготовки даже при выходе из строя силовой установки. В конструкциях зажимных узлов, особенно с использованием клиновых механизмов, очень часто применяются различные комбинированные варианты передачи усилия с использованием дополнительных элементов: рычажных, плунжерно-толкателей, поворотных прихватов и т.д. Однако все эти элементы выполняют четко определенное функциональное назначение, имеют определенную кинематику движения и, соответственно, конструктивные признаки, поэтому могут рассматриваться как элементы унификации.

Узел базирования в УЗП определяется в первую очередь технологической схемой базирования и геометрическими параметрами заготовки. На практике применяются почти все типовые схемы базирования с использованием установочных пальцев, обычных и самоцентрирующих призм, планок и т.д. Все эти элементы имеют четкое функциональное назначение и конструктивные элементы. В общем случае оригинальными являются поверхности, которые контактируют с заготовкой, а унификации подлежат элементы (поверхности), сопрягающиеся с корпусом и другими элементами. Анализ конструкций базовых элементов позволяет сделать вывод о возможности типизации и унификации конструкции деталей узла базирования. Основная задача дальнейших исследований классифицировать применяемые технологические схемы базирования и используемые базы с точки зрения конструктивных особенностей базовых и сопрягаемых с корпусом поверхностей.

К элементам базирования можно отнести и элементы, которые участвуют в базировании и установке дополнительных устройств в процессе обработки заготовки. Это, в первую очередь, пальцы для базирования и установки кондукторных плит и приспособлений. Применяемые в этом случае установочные

пальцы и втулки практически полностью унифицированы уже сейчас.

В отдельную группу выделены соединительные и дополнительные элементы, которые обеспечивают сопряжение всех основных узлов приспособления и отдельных элементов. Сюда относятся различные втулки, удлинители, байонеты и т.д. Их применение зависит от компоновочного решения УЗП. Предварительный анализ вариантов их использования позволяет сделать вывод о достаточно ограниченном конструктивном исполнении, что позволяет выделить их в отдельную группу, которая в дальнейшем может быть унифицирована.

**Выводы.** На основе анализа компоновок установочных зажимных приспособлений определены основные классификационные признаки, позволяющие провести систематизацию и разработать унифицированные компоновочные схемы приспособлений.

На основе систематизации основных компоновочных схем разработаны модели, которые в дальнейшем позволят осуществить конструкторскую унификацию ограниченного множества разных исполнений приспособлений путем приведения этого множества к целесообразному минимуму.

Разработка унифицированных узлов позволит в дальнейшем разработать обобщенную технологию изготовления деталей УЗП с учетом параметрических рядов и создать сборочные комплекты для минимизации сроков запуска агрегатированного оборудования в производственный процесс.

#### Список литературы:

1. Горанский Г.К. Автоматизированные системы технологической подготовки производства в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1976. – 240 с.
2. Горанский Г.К., Горелик А.Г., Зозулевич Д.М. Элементы теории автоматизации машиностроительного проектирования с помощью вычислительной техники. – Минск: Наука и техника, 1970. – 285 с.
3. Ракович А.Г. Автоматизация проектирования технологической оснастки. – Киев, 1987. – 135 с.
4. Ракович А.Г. Основы автоматизации проектирования технологических приспособлений / Под ред. Е.А.Стародетко. – Мн.: Наука и техника, 1985. – 285 с.
5. Кузнецов Ю.Н. Унификация и стандартизация станочных приспособлений. Основные требования. – М.: Изд. стандартов, 1976. – 100 с.
6. Пермяков А.А., Яковенко И.Э., Фадеев А.В. О моделировании компоновок УЗП многопозиционных агрегатных станков //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. - №6. – С.148-152.
7. Пермяков А.А., Тимофеев Ю.В., Яковенко И.Э. Оптимизация проектирования и производства УЗП на основе унификации компоновочных решений. //Вестник ХГПУ. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - Вып.110. - С.70-74
8. Карпусь В.Е. Универсально-сборные перенастраиваемые приспособления / В. Е. Карпусь, В. А. Иванов // Вестник машиностроения. – 2008. – №11. – С. 46–50.
9. Karpus V.E., Ivanov V. A. Universal-composite adjustable machine-tool attachments. *Russian Engineering Research*, 2008, Vol. 28, No. 11, pp. 1077–1083.
10. Классификатор ЕСКД. Иллюстрированный определитель деталей. М.: Издательство стандартов, 1977. – 257с.
11. М.А. Терехов, И.Э. Яковенко. К вопросу унификации установочно – зажимных приспособлений в серийном производстве. // VIII Університетська науково-практична студентська конференція магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (22–24 квітня 2014 року: матеріали конференції: у 3-х ч. – Ч. 1 / оргкомітет: Л.Л. Тованьянський (голова) та ін. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014.

## References (transliterated)

1. Goranskiy G.K. *Avtomatizirovannyye sistemy tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva v mashinostroenii* [Automated system of technological preparation of production in mechanical engineering]. – Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. – 240 p.
2. Goranskiy G.K., Gorelik A.G., Zozulevich D.M. *Elementy teorii avtomatizatsii mashinostroitelnogo proektirovaniya s pomoschyu vychislitel'noy tekhniki* [Elements of the theory of mechanical design automation using computer technology]. – Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1970. – 285 p.
3. Rakovich A.G. *Avtomatizatsiya proektirovaniya tehnologicheskoy osnastki*. [Automatization Design of the Tooling]. – Kiev, Nauka i tekhnika Publ., 1987. – 135 p.
4. Rakovich A.G. *Osnovy avtomatizatsii proektirovaniya tehnologicheskikh prispособleniy* [Fundamentals of design automation of technological devices] Pod red. E.A.Starodetko.- Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1985.- 285 p.
5. Kuznetsov Yu.N. *Unifikatsiya i standartizatsiya stanochnykh prispособleniy. Osnovnyye trebovaniya* [Unification and standardization of machine tool accessories. Primary requirements]. – Moscow, Izd. Standartov Publ., 1976. – 100 p.
6. Permyakov A.A., Yakovenko I.E., Fadeev A.V. O modelirovanii komponentov UZP mnogopozitsionnykh agregatnykh stankov [On modeling layouts SLM multiposition transfer machines]. *Visnik Natsionalnogo tehnicheskogo univ'ersiteta «HPI»*. [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University "KhPI". Series: Machine building technology] – Kharkiv, NTU «KhPI» Publ. – 2003. – no.6. – pp.148-152.
7. Permyakov A.A., Timofeev Y.V., Yakovenko I.E. Optimizatsiya proektirovaniya i proizvodstva UZP na osnove unifikatsii komponentovnykh resheniy [Optimization of the design and production of SPDs on the basis of unification of layout solutions]. *Vestnik HGPU* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University]. – Kharkov, HGPU Publ. - 2000. – no.110. - pp.70-74.
8. Karpus V. E. Universalno-sbornyye perenalzhivaemye prispособleniya [Modular adjustable fixtures]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2008, no. 11, pp. 46–50.
9. Karpus V.E., Ivanov V. A. Universal-composite adjustable machine-tool attachments. *Russian Engineering Research*, 2008, Vol. 28, No. 11, pp. 1077–1083.
10. Klassifikator ESKD. Illyustrirovannyiy opredelitel detaley [Qualifier ESKD. Illustrated Manual of the details]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1977. – 257p.
11. Terehov M.A, Yakovenko I.E. K voprosu unifikatsii ustanovochno – zazhimnykh prispособleniy v seriynom proizvodstve. [On the issue of unification of the mounting - clamping in serial production]. *Materialy VIII Un'iversitetska naukovopraktichna studentska konferentsiya magistrantiv Natsionalnogo tehnicheskogo univ'ersitetu «Harkivskiy politehnikhnyi Institut» (22–24 kvitnya 2014 roku: u 3-h ch. – Ch.1 )* [Abstracts of the VIII University students science-practice conference NTU "KhPI", Part 1 (April, 22-24, 2014 – Kharkov), Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2014, p.112.

Поступила (received) 12.11.15

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**До питання про уніфікацію настановно-затискних пристроїв агрегатованого обладнання./ О. А. Пермяков, І. Е. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 38–42. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.**

**К вопросу об унификации установочно зажимных приспособлений агрегатированного оборудования/ А.А. Пермяков, И.Э. Яковенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 38–42. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.**

**About the question of the unification of clamping setting fixtures for aggregate equipment / A. A. Permyakov, I.E. Yakovenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.38–42. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Пермяков Олександр Анатольович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: perm\_a@i.ua.

**Пермяков Александр Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения и металлорежущих станков» НТУ «ХПІ», г. Харьков; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: perm\_a@i.ua.

**Permyakov Alexandr Anatolievich** – Doctor of Technical Sciences, Full PhD, Professor, Head of the Department "Technology of mechanical engineering and metal-cutting machines" NTU "KhPI", Kharkiv; tel.: (057) 720-66-25; e-mail: perm\_a@i.ua.

**Яковенко Ігор Едуардович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com.

**Яковенко Игорь Эдуардович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения и металлорежущие станки» НТУ «ХПІ», г. Харьков; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com.

**Yakovenko Igor Eduardovich**. - Candidate of Technical Sciences, PhD, Associate Professor of the Department "Technology of mechanical engineering and metal-cutting machines" NTU "KhPI", Kharkiv; tel.: (057) 720-66-25; e-mail: igor.dych59@gmail.com.

УДК 621.865.6

Г. И. КОСТЮК

**ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИОНОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР ТРЕБУЕМОГО РАЗМЕРА ЗЕРНА В ТВЕРДОМ СПЛАВЕ Т30К4**

Подано залежності розміру зерна від глибини його залягання (мінімальна і максимальна) для різних енергій (200, 2000, 20000 eV) і зарядів ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) і широкого кола іонів ( $B^+, C^+, N^+, Al^+, V^+, Cr^+, O^+, Fe^+, Ni^+, Co^+, Y^+, Zr^+, Mo^+, Gf^+, Ta^+, W^+, Pt^+$ ) при дії їх на твердий сплав (ТС) Т30К4. Проведені дослідження дають можливість створити шари наноструктур з різними властивостями і на різній глибині в ТС і забезпечити конструювання наноструктурних шарів з необхідними фізико-механічними характеристиками. Ці дослідження дозволяють розширити діапазон застосування пластин з ТЗ Т30К4 і дати можливість реалізувати всі переваги наноструктурних шарів, а значить, забезпечити високу зносостійкість, стійкість, вигінну міцність, а в кінцевому рахунку підвищити працездатність і ефективність різального інструмента з Т30К4.

**Ключові слова:** технологічні параметри, твердий сплав, наноструктури, різальний інструмент, розмір зерна.

Представлены зависимости размера зерна от глубины его залегания (минимальная и максимальная) для разных энергий (200, 2000, 20000 эВ), и зарядов ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ) и широкого круга ионов ( $B^+, C^+, N^+, Al^+, V^+, Cr^+, O^+, Fe^+, Ni^+, Co^+, Y^+, Zr^+, Mo^+, Gf^+, Ta^+, W^+, Pt^+$ ) при действии их на твердый сплав (ТС) Т30К4. Проведенные исследования дают возможность создать слои наноструктур с разными свойствами и на разной глубине в ТС и обеспечить конструирование наноструктурных слоёв с необходимыми физико-механическими характеристиками. Эти исследования позволяют расширить диапазон применимости пластин из ТС Т30К4 и дать возможность реализовать все преимущества наноструктурных слоёв, а значит, обеспечить высокую износостойкость, стойкость при действии ударных нагрузок, изгибную прочность, а в конечном счёте повысить работоспособность и эффективность режущего инструмента из Т30К4.

**Ключевые слова:** технологические параметры, твердый сплав, наноструктуры, режущий инструмент, размер зерна.

Presents the dependence of the grain size of its depth (minimum and maximum) for different energies (200, 2000, 20000 eV) and charge ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ), and a wide range of ions ( $B^+, C^+, N^+, Al^+, V^+, Cr^+, O^+, Fe^+, Ni^+, Co^+, Y^+, Zr^+, Mo^+, Gf^+, Ta^+, W^+, Pt^+$ ) under the influence of them on the cemented carbide (НА) TiC30Co4. The studies make it possible to create layers of nanostructures with different features and at different depths in the vehicle and ensure that the design of nanostructured layers with the necessary physical and mechanical properties. Studies can extend the range of applicability of the plates of the vehicle Т30К4i give the opportunity to realize all the benefits of nanostructured layers, and thus ensure high wear resistance, impact resistance, flexural strength, and ultimately improve the efficiency and effectiveness of the cutting tool of TiC30Co4.

**Keywords:** technological parameters, hard alloy nanostructures, cutting tools, grain size.

**Введение.** Несмотря на то, что твердый сплав (ТС) Т30К4 относительно недорогой (из-за относительно не большой доли карбида вольфрама), он широко не применяется при механической обработке, т.к. он зачастую не обеспечивает необходимые стойкость и снимаемый объём материала за период стойкости. Наноструктурные (НС) слои на его поверхности могут существенно повысить его стойкость (работоспособность) и снимаемый объём материала за период стойкости (эффективность). Поэтому исследование возможности получения НС, является актуальной и важной задачей для инструментального производства и машиностроения в целом.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций», «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

**Состояние вопроса.** К сожалению, в настоящее время нет достаточно систематизированных исследований по ТС Т30К4, хотя теоретические предпосылки к оценке работоспособности и эффективности и даже физико-механических характеристик можно провести, используя результаты работ [1–8].

Всё это может дать возможность оценить требуемые технологические параметры для получения НС на различных глубинах в материале этого твёрдого сплава, а значит, обеспечит повышение работоспособности и эффективности, что является актуальной задачей машиностроения.

**Постановка задачи исследования.** Исследование проводилось на основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости, которая позволяла получить поля температур и температурных напряжений, скорость изменения температуры во времени, а значит, с учётом критериев получения наноструктур по диапазону температур, скорости изменения температур, значениям температурных напряжений оценить области материала ТС, где реально можно получить наноструктуры.

Всё это позволяет оценить объём нанозерна, а следовательно, и его размеры, а также глубины залегания этого зерна, что позволит, выбирая энергию, заряд и сорт иона (обеспечивающие необходимый размер зерна), найти технологические параметры потоков обрабатывающих ионов, которые дадут возможность получить слой наноструктур необходимой толщины.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Для широкого круга ионов ( $B^+, C^+, N^+, Al^+, V^+, Cr^+, O^+, Fe^+, Ni^+, Co^+, Y^+, Zr^+, Mo^+, Gf^+, Ta^+, W^+, Pt^+$ ) для разных энергий (200, 2000, 20000 эВ) и зарядов ( $z = 1,$

© Г.И. Костюк, 2016

$z = 2, z = 3$ ) были построены зависимости размера зерна от минимальной ( $h_{\min}$ ) и максимальной ( $h_{\max}$ ) глубины залегания. Так, на рис. 1 показаны исследуемые зависимости для случая действия ионов бора ( $B^+$ ), причём эта зависимость для минимальной глубины залегания имеет разрывы (рис. 1, а), тогда как для максимальной зависимости – она практически линейна в логарифмическом масштабе.

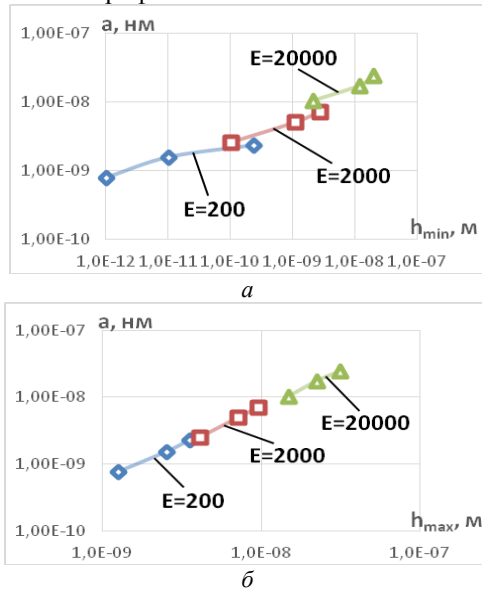


Рис. 1 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов бора ( $B^+$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

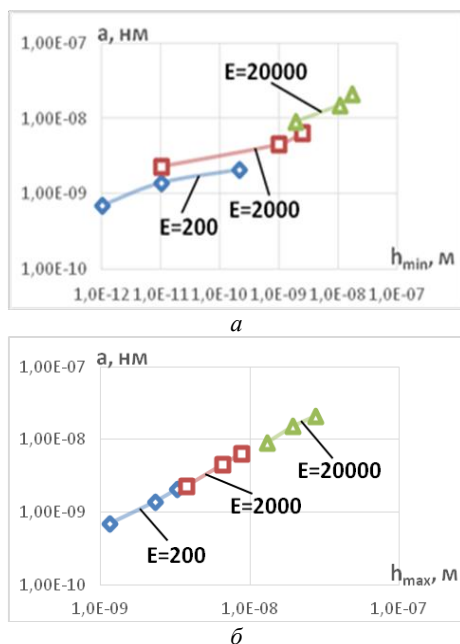


Рис. 2 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов углерода ( $C^+$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

Переход к более тяжёлому иону ( $C^+$ ) приводит к более значительному отклонению значений размеров зерна для ионов различных энергий (200, 2000, 20000 эВ), причём наблюдаются эквидистантные кривые (рис. 2, а) для минимальной глубины залегания,

тогда как для максимальной глубины – реализуется практически прямая (рис. 2).

Для иона азота реализуются кривые для энергий 2000, 20000 эВ, тогда как для 200 эВ наноструктуры образуются, начиная с поверхности материала (рис. 3, а). В этом случае для максимальной глубины залегания размер зерна растёт практически по прямой (рис. 3, б).

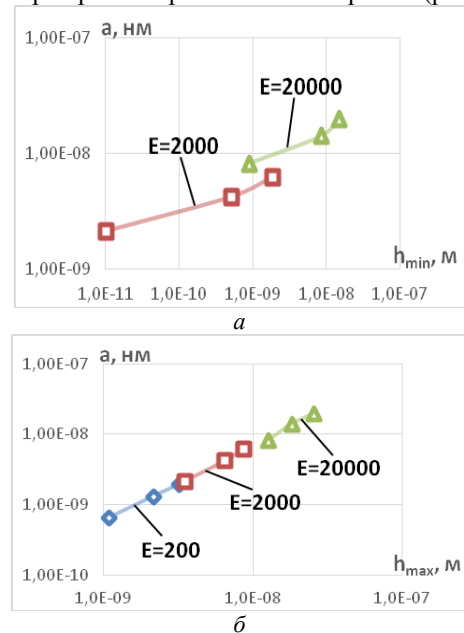


Рис. 3 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов азота ( $N^+$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

Использование иона алюминия также приводит к наличию эквидистантных кривых для энергий 2000, 20000 эВ. При 200 эВ образования наноструктур начинается с поверхности (рис. 4, а), с ростом же максимального значения глубины залегания растёт и размер зерна (рис. 4, б).

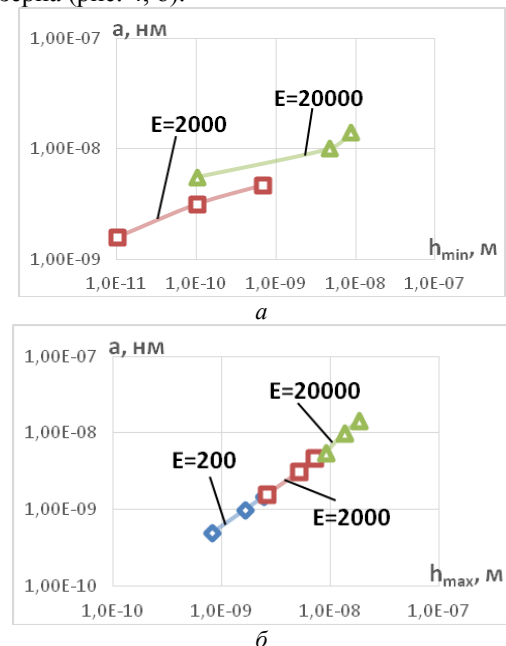


Рис. 4 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Al^+$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

В этом случае, как и во всех предыдущих, для меньших энергий реализуются меньшие размеры зерна. Действия же иона ванадия на ТС Т30К4 приводит к изменению характера зависимости размера зерна от минимальной глубины залегания нанокластера. Здесь существуют разрывы по значению глубины залегания, тогда как в предыдущем случае мы имеем два значения размера зерна при одной и той же глубине залегания при разных энергиях (рис. 5, а). Характер зависимости размера зерна от максимальной глубины залегания практически сохранился (рис. 5, б).

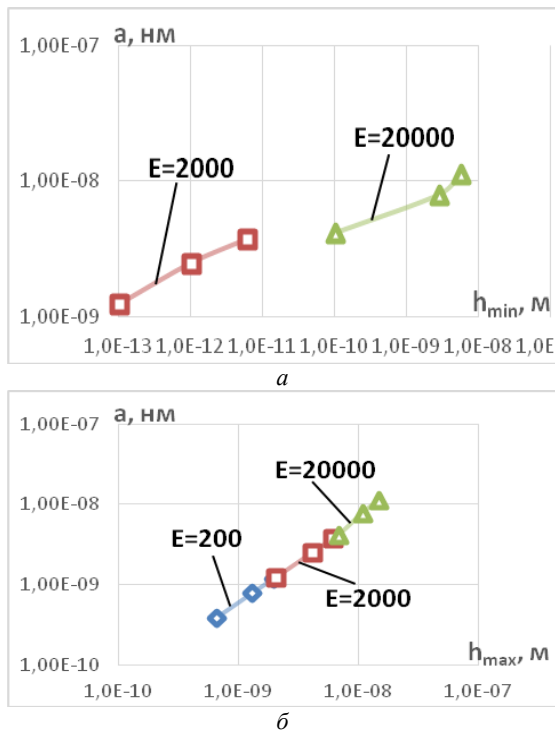


Рис. 5 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $V^+$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

Для более тяжёлого иона хрома характер зависимости практически сохранился, но зависимость размера зерна от минимальной глубины залегания представлена только для энергии 20000 эВ, тогда как для других энергий наноструктуры начинают образовываться с поверхности (рис. 6, а). Характер зависимости размера зерна от максимальной глубины залегания сохранился (рис. 6, б).

Для иона кислорода зависимость зерна от минимальной глубины залегания имеет две кривые для энергий 2000 и 20000 эВ, так как ион кислорода легче, чем ранее рассмотренные (рис. 7, а), а зависимость размера зерна от максимальной глубины залегания имеет линейный характер (рис. 7, б)

Переход к более тяжёлым ионам (железо и никель) приводит к тому, что зависимости размера зерна от минимальной глубины залегания реализуется только кривая для 2000 эВ, когда как для других энергий наноструктуры начинают образовываться на поверх-

ности (рис. 8, а; 9, а). Зависимости же размера зерна от максимальной глубины залегания сохранились.

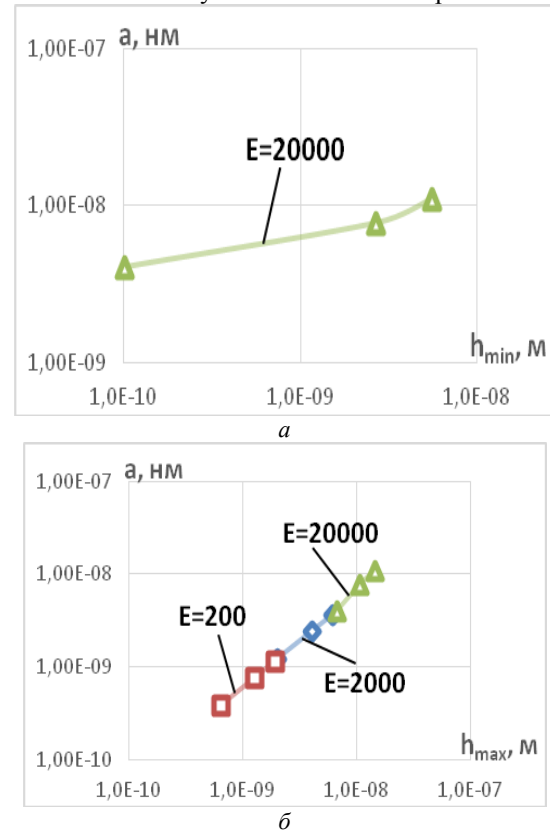


Рис. 6 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Cr^+$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

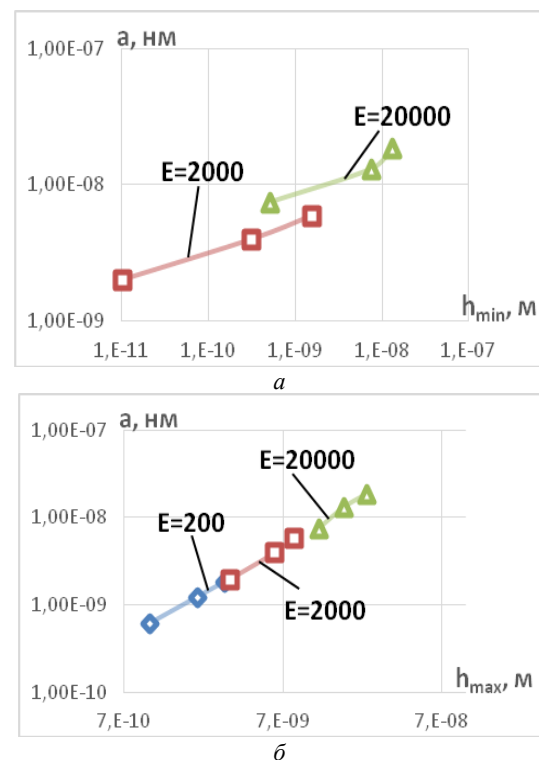


Рис. 7 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $O^+$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

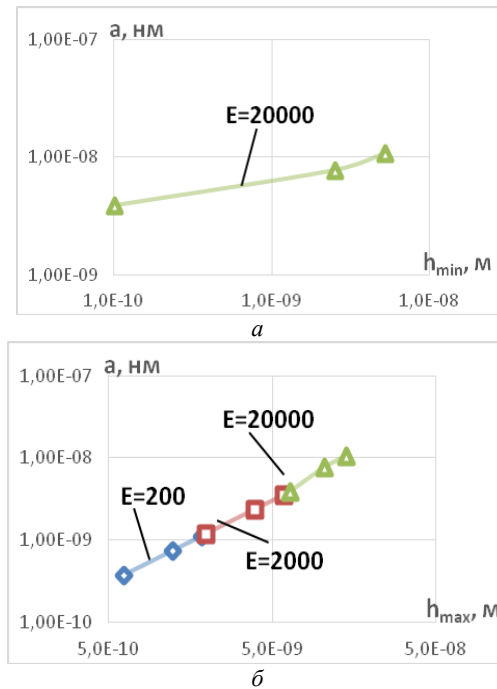


Рис. 8 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Fe^+$ ) с различной энергией ( $E = 200$ ,  $E = 2000$ ,  $E = 20000$ ) для Т30К4

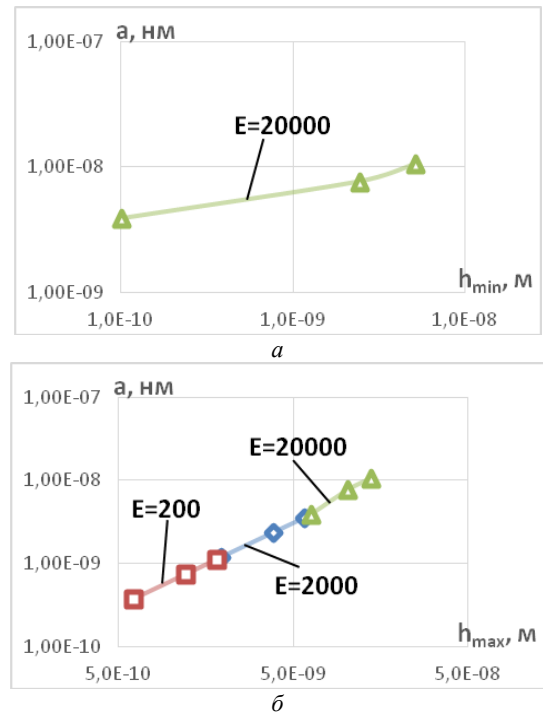


Рис. 10 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Co^+$ ) с различной энергией ( $E = 200$ ,  $E = 2000$ ,  $E = 20000$ ) для Т30К4

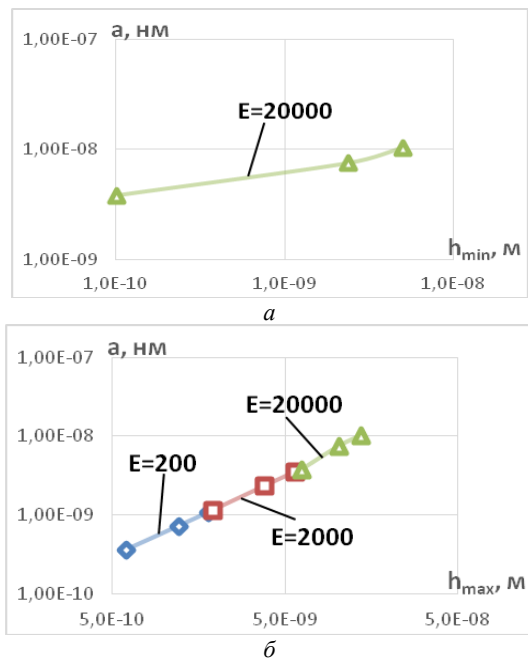


Рис. 9 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Ni^+$ ) с различной энергией ( $E = 200$ ,  $E = 2000$ ,  $E = 20000$ ) для Т30К4

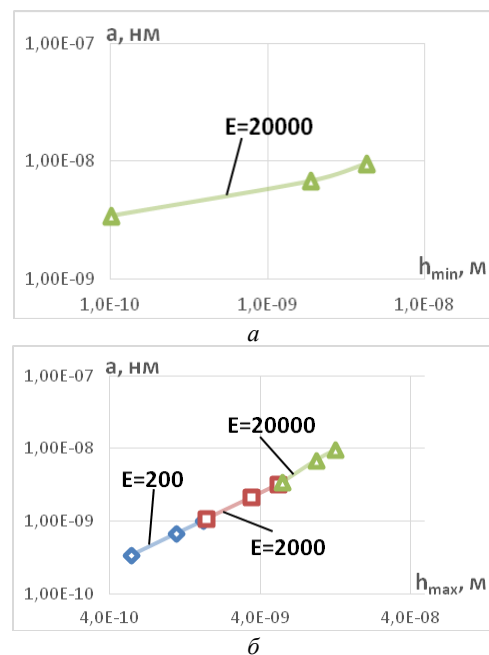


Рис. 11 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Y^+$ ) с различной энергией ( $E = 200$ ,  $E = 2000$ ,  $E = 20000$ ) для Т30К4

Действие ионов кобальта, иттрия и циркония также приводит к тому, что размер зерна зависит только от минимальной глубины залегания для энергии 20000 эВ, тогда как при меньших энергиях наноструктуры образуются с поверхности (рис. 10, а, 11, а, 12, а). Для этих ионов зависимость размера зерна от максимальной глубины залегания практически сохранилась (рис. 10, б, 11, б; 12, б).

Анализ зависимости размера зерна НК от минимальной глубины залегания при действии ионов молибдена, гафния, тантала, вольфрама и платины имеет кривые только для энергии 20 КэВ. При других исследуемых энергиях наноструктуры образуются с поверхности (рис. 13, а, 14, а, 15, а, 16, а, 17, а).

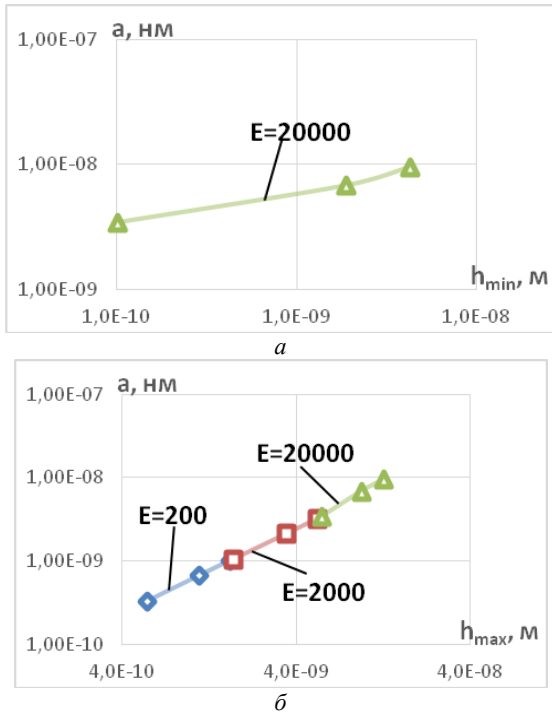


Рис. 12 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Zr^{+}$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

Зависимость же размера зерна от максимальной глубины залегания для этих ионов практически имеет вид такой же, как и для предыдущих (рис. 13, б, 14, б, 15, б, 16, б, 17, б).

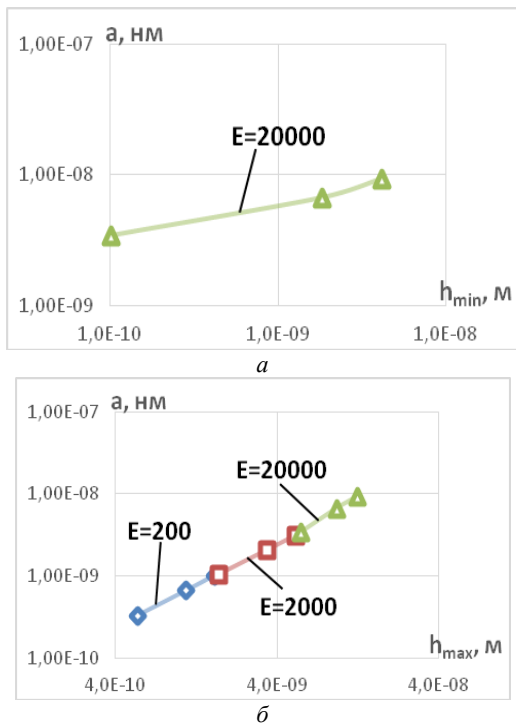


Рис. 13 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Mo^{+}$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

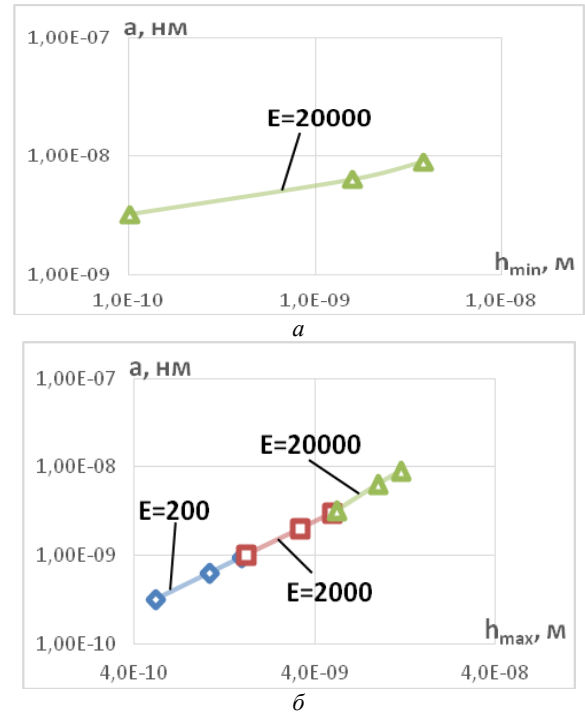


Рис. 14 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Hf^{+}$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

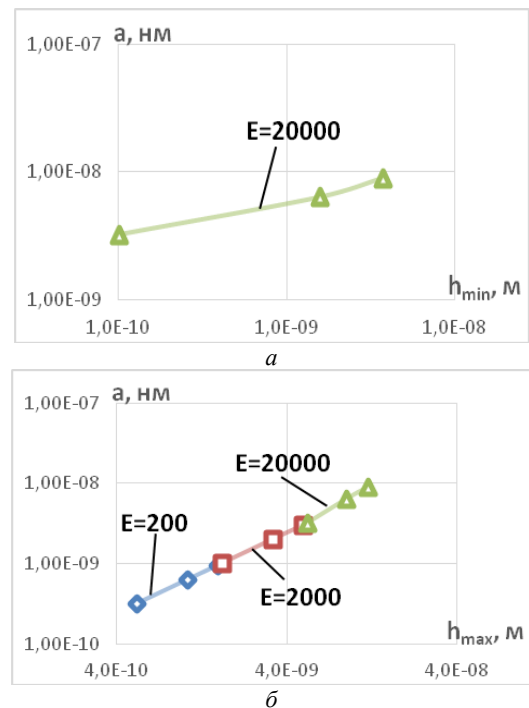


Рис. 15 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Ta^{+}$ ) с различной энергией ( $E = 200, E = 2000, E = 20000$ ) для Т30К4

Зная минимальную и максимальную глубину залегания для каждого из сортов ионов и зарядового числа ( $z = 1, z = 2, z = 3$ ), определяются размеры слоя, в которых будут реализованы наноструктуры. Варьируя сортом иона, его зарядом и энергией, мы можем выбирать слои таким образом, чтобы каждый последующий слой увеличивал зону образования НС.

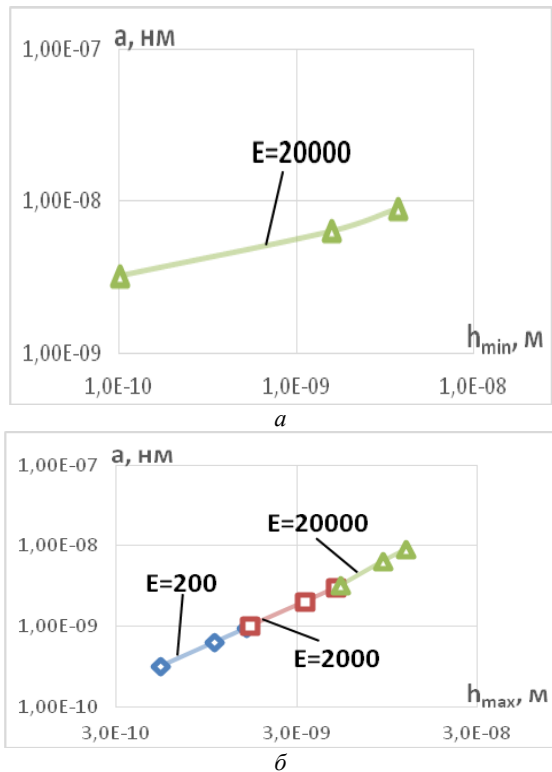


Рис. 16 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $W^+$ ) с различной энергией ( $E = 200$ ,  $E = 2000$ ,  $E = 20000$ ) для Т30К4

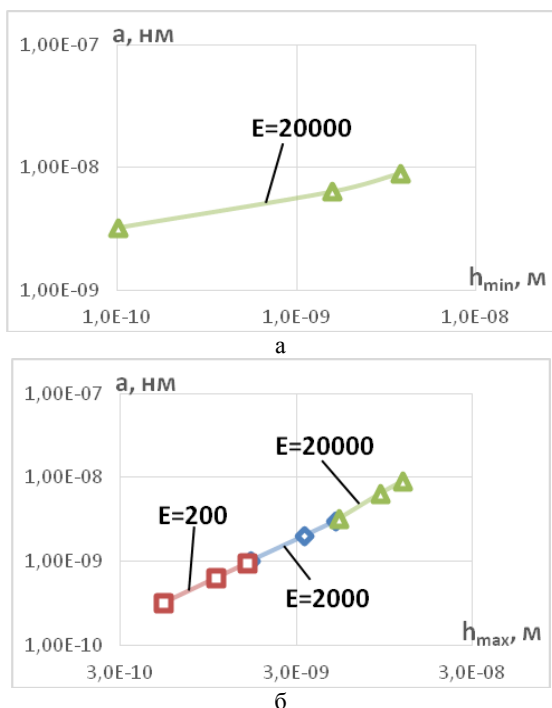


Рис. 17 – Зависимость размера зерна нанокластера (НК) от минимальной (а) и максимальной (б) глубины залегания НК при действии ионов алюминия ( $Pt^+$ ) с различной энергией ( $E = 200$ ,  $E = 2000$ ,  $E = 20000$ ) для Т30К4

Следовательно, мы можем конструировать слои наноструктур необходимых геометрических размеров, а с учётом влияния размера зерна на физико-механические и эксплуатационные характеристики

детали и режущего инструмента обеспечить высокую работоспособность и эффективность РИ и детали.

### Выводы.

1) Исследование зависимости размеров зерна от минимальной и максимальной глубины залегания показали, что зависимость размера зерна от минимальной глубины залегания для лёгких ионов реализуется практически для всех энергий (от бора до азота). Повышение массы иона приводит к образованию НС при энергии 200 эВ начиная с поверхности (ионы кислорода, алюминия и ванадия). Дальнейшее увеличение массы ионов (железо, никель, иттрий, цирконий, молибден, гафний, тантал, вольфрам, платина) приводит к тому, что минимальная глубина залегания реализуется только для энергии 20 кэВ. Для энергии 200 и 2000 эВ НС начинают образовываться с поверхности.

2) Проведенные исследования позволяют конструировать слои НС с разным размером зерна на значительной глубине в материале, причём, варьируя сортом, зарядом и энергией ионов, можно обеспечивать различные свойства материала по глубине, т.е. получить перемежающиеся слои твердого и мягкого материала. Можно изменять адгезионное взаимодействие контактирующих материалов, что важно для деталей пар трения и РИ. Всё это, в конечном счете, даст возможность конструировать поверхностные слои материала с заданными свойствами.

### Список литературы

1. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрывтиями и наноструктурными модифицированными слоями: Моногр.-справ.: в 2 кн. / Г. И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. Костюк Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. Костюк Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк Г. И. Наноструктуры и нанопокрывтия: перспективы и реальность: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АНУ, 2003. – 412 с.
8. Гречихин Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
11. Андриевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металлоредение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.

### Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a



- layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur: monogr* [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
  3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
  4. Kostyuk, G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
  5. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy: ucheb.posobiye* [The scientific basis for the creation of modern technologies] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2008. 552 p.
  6. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
  7. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, AĠNU, 2003. 412 p.
  8. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologii* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
  9. Aksenov, I. I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy* [Vacuum arc erosion plasma sources] – Kharkiv, NII «KHFTI», 2005. 211 p.
  10. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
  11. Andriyevskiy, R. A. *Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy* [Nanomaterials: concept and modern problems] Fizika metallov i metallovedeniye. 2003. – Vol. 91, № 1. – p.p. 50 – 56.

Поступила (received) 14.11.16

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Вибір технологічних параметрів іонов для отримання наноструктур необхідного розміру зерна в твердих сплавах Т30К4 / Г. І. Костюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 43–49. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Выбор технологических параметров ионов для получения наноструктур требуемого размера зерна в твердом сплаве Т30К4 / Г. И. Костюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 43–49. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Study opportunities nanostructures on hard alloy WCCo8 under pulsed laser radiation of short duration / G. I. Kostyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.43–49. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-004X.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Костюк Геннадий Игоревич** – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Kostyuk Gennadiy Igorevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovsky, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

УДК 621.9.02

О.Р. ОНИСЬКО

## МОДЕЛЮВАННЯ БІЧНОГО ПРОФІЛЮ РІЗАЛЬНОЇ КРОМКИ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІЗЦІВ ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАМКОВОЇ НАРІЗИ

Виробництво бурильних труб включає технологічний процес виготовлення замкових нарізів на їх кінцях. До вказаних труб пред'явлено широкий діапазон вимог щодо міцності, починаючи із 400 МПа і аж до 1100 МПа. В той сам час сучасні виробники різців для точіння нарізів не застосовують відповідний діапазон геометричних параметрів, серед яких передній кут, що мав би варіюватися у межах від  $20^\circ$  до  $-10^\circ$ . Існуючі профілі інструментів виконані тільки для інструментів з нульовими значеннями переднього кута і кута нахилу різальної кромки. Отримано геометричну модель бічного прямолінійного профілю різальної кромки різця для точіння замкової нарізи, який залежить від величини статичного переднього кута у вершинній точці і кута підйому нарізи, яка визначається за координатами двох його крайніх точок.

**Ключові слова:** замкова нарізь, різець, передній кут, кут підйому нарізи, гіперболічний профіль, профіль різальної кромки, кут нахилу різальної кромки, конічна поверхня.

Производство бурильных труб включает процесс технологический процесс изготовления замковых резьбы на их концах. К указанным трубам предъявлено широкий диапазон требований по прочности, начиная с 400 МПа и вплоть до 1100 МПа. В это же время современные производители резцов для точения резьбы не применяют соответствующий диапазон геометрических параметров, среди которых передний угол, который должен варьироваться в пределах от  $20^\circ$  до  $-10^\circ$ . Существующие профили инструментов выполнены только для инструментов с нулевыми значениями переднего угла и угла наклона режущей кромки. Получено геометрическую модель бокового прямолинейного профиля режущей кромки резца для точения замковой резьбы, который зависит от величины статического переднего угла в вершинной точке и угла подъема резьбы, которая определяется по координатам двух его крайних точек.

**Ключевые слова:** замковая резьба, резец, передний угол, угол подъема резьбы, гиперболический профиль, профиль режущей кромки, угол наклона режущей кромки, коническая поверхность.

Drill pipe production includes manufacturing process of its tool-joint tapered thread. There is a wide range of requirements for strength, ranging from 400 MPa and up to 1100 MPa to these pipes. At the same time, today's manufacturers cutting tools for threading do not apply the appropriate range of geometric parameters, including back rake angle, which requires range from  $20^\circ$  to  $-10^\circ$ . Existing instrument profiles are produced only for cutting tool with zero back rake angle and zero side rake angle. Perhaps this situation exists because of the absence of a clear algorithm simulation cutters with the profile. The view of impossibility of the creation of such instruments is prevailing today. We obtained the geometric model of the straight side cutting edge tool profile for tool-joint tapered thread, which depends on the static back rake angle in front vertex point and thread lead angle, defined by the coordinates of its two extreme points.

**Keywords:** Tool-joint tapered thread, cutter, back rake angle, lead angle, hyperbolic profile, cutting edge profile, side rake angle, tapered surface.

**Вступ.** Великосерійне виробництво бурильних труб включає в себе технологічний процес виготовлення гвинтової нарізи на її кінцях. Здебільшого вказаний процес на вітчизняних та зарубіжних підприємствах виконується з допомогою одно чи багатониткових різців та різцевих головок. Динаміка розвитку нафтовидобувної галузі диктує виробникам труб нафтогазового сортаменту усе дужчі вимоги до їх міцності. До бурильних труб, які працюють у відносно легких породах вимоги найменші і згідно зі стандартом [1] границя міцності  $s_b < 400$  Мпа. Для важких умов буріння пропонують труби міцність яких за  $s_b > 1000$  Мпа. У нафтогазовій індустрії застосовують також труби границя міцності яких навіть більша за 1100 Мпа [2]. У той сам час розмаїті умови середовища буріння, особливо похилого спричиняють все зростаючий попит на міцність і точність саме нарізевих поверхонь, тобто замків. Власне стан замкових нарізів активно визначають якість бурової колони. Тож вельми актуальною є проблема ефективності нарізання замків і підвищення їх якості, а значить точності цих гвинтових конічних нарізів.

**Мета роботи** полягає у отриманні алгоритму моделювання бічного профілю різальної кромки у залежності від геометричних параметрів різця для виготовлення замкової нарізи.

**Аналіз останніх досліджень.** Найближче до поставленої мети підходить праця [3]. Відповідно до [3] на рисунку 1 проілюстровано схему отримання пе-

рерізу конічної поверхні і площини, яка нахилена до осі конуса під кутом  $\lambda$ .

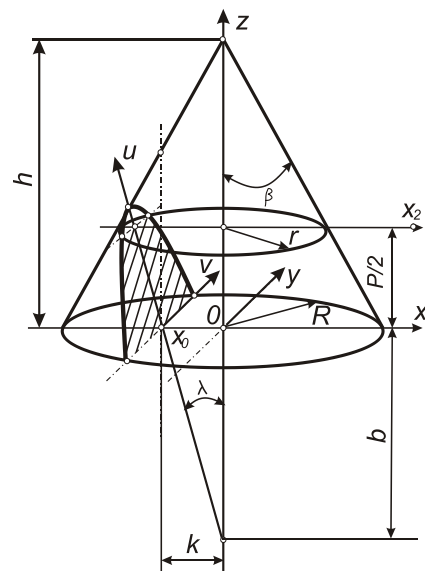


Рис.1 – Схема отримання перерізу конічної поверхні і площини, яка є нахилена до осі конуса на кут  $\lambda$ .

У роботі [3] отримано формулу залежності профілю різальної кромки від геометричних параметрів: переднього кута і кута нахилу різальної кромки та зовнішнього та внутрішнього діаметрів нарізи.

© О.Р. Онисько, 2016

$$v = \sqrt{c \frac{u^2 t^2}{\sqrt{1+t^2}} - \left(k - \frac{u}{\sqrt{1+t^2}}\right)^2}, \quad (1)$$

де  $c = \tan \alpha$ ,

$$t = \tan\left(\lambda + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$k = r \sin \gamma,$$

Слід уточнити, що  $\alpha$  – це кут профілю нарізі.

Згідно із [4]  $\alpha = 60^\circ$  (див. рис.2). Кут  $\lambda$  це величина повороту різня навколо осі, що проходить через його вершину і є перпендикулярною до осі нарізі. По суті це кут підйому нарізі. Кут  $\gamma$  – це величина статичного переднього кута у вершині різальної кромки. Параметр  $r$  – це по суті свій параметр  $r_{min}$  котрий побудовано на рисунку 2.

У працях [5,6] доведено, що теоретичний гіперболічний профіль різальної кромки технологічно доцільно замінити на прямолінійний. По суті це доводить, що криву CD на рисунку 4 доцільно підмінити на відрізок CD.

У роботі [7] йдеться про рекомендації щодо величин передніх кутів для виготовлення нарізей в деталях з різних за міцністю матеріалів. Автор вказує на діапазон величин переднього кута від  $\gamma = 20^\circ$  для сталей з  $\sigma_b < 400 \text{ Мпа}$  до  $\gamma = 0^\circ$  для сталей із міцністю до 1177 Мпа. Окрім того у роботі [7] вказуються величини передніх кутів, що сягають відємних значень  $\gamma = -10^\circ$  для обробки нарізей у деталях із міцністю понад 1765 Мпа. Останні відносяться до групи VIII важкообробних сталей [8]. Такі сталі застосовують для виготовлення важконавантажених деталей, а тому вони у найближчій перспективі можливо постануть у ролі матеріалів для нафтогазового сортаменту труб. Сучасні виробники нарізевих інструментів (у тому числі різців для виготовлення нарізей) не виготовляють інструменти у яких передній кут відмінний від 0 [9]. Менше того, профіль різальних кромки провідних виробників функціонально не залежить від кута підйому нарізі, яка як відомо у трубах нафтогазового сортаменту коливається у широких межах від  $0^\circ$  до  $5^\circ$ .

**Постановка проблеми.** На основі математичних залежностей слід побудувати модель бічного профілю різальної кромки різця, що призначений для виготовлення стандартних замкових гвинтових нарізей, яка є функціонально залежною від величини статичного переднього кута у вершині, а також від кута підйому нарізі.

**Отримання заданого профілю трикутної різьби.** Бічний профіль замкової нарізі за [9] є прямолінійним відрізком спряженим з заданими радіусними профілями у впадинах і вершинах. На рисунку 1 показано ламану лінію DAB, що є вихідним трикутником нарізі згідно із [9].

Згідно зі стандартом [9] профіль є асиметричним відносно осі AG. Кут профілю становить  $60^\circ$ . Інші параметри, які показано на рисунку 1 представлені у таблиці 1. У таблиці також подані їх значення при умові що форма профілю – I.

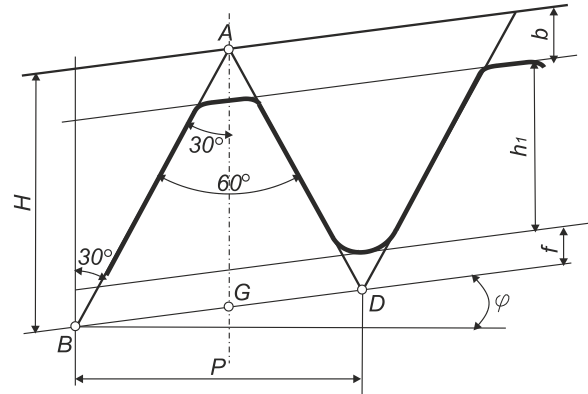


Рис. 2 – Схема профілю замкової нарізі згідно зі стандартом ГОСТ 28487-90

Таблиця 1. Параметри замкової нарізі за стандартом ГОСТ 28487-90

Назва параметру	Значення параметру
Крок нарізі P	5,08 мм
Висота вихідного профілю H	4,376 мм
Висота профілю h1	2,993 мм
Кут нахилу нарізі φ	7° 7'30"
Зріз вершини, b	0,875 мм
Зріз впадини, f	0,508 мм

**Побудова графічної моделі профілю різальної кромки у площині передньої поверхні, що нахилена під переднім кутом і кутом λ, який відповідає куту підйому нарізі.** На рисунку 3 проілюстровано вище згадану схему замкової нарізі із прив'язкою до системи координат XYZ. Вісь Z співпадає з віссю нарізі. Профіль нарізі спроектований у площині ZOХ. Координати точок вихідного трикутника D, A, B, по осі Z визначаються відповідно: 0, 0,5P, По осі X Ці координати величинами  $r_{min}$  для точки A і  $r_{max}$  для точок B, D.

При умові, якщо мова йде про зовнішню нарізь, то зазначені величини можна визначити за формулами:

$$r_{min} = \frac{d_3(1 + 2l \tan(\varphi))}{2} - h_1 - b, \quad (2)$$

$$r_{max} = \frac{d_3(1 + 2l \tan(\varphi))}{2} + f, \quad (3)$$

Де

$d_3$  – діаметр меншої основи конуса;

$l$  – відстань від торця конуса до певного витка нарізі.

На рисунку 4 зображено комплексне креслення конічної поверхні з основами  $2r_{min}$  і  $2r_{max}$  та висотою P/2. Конус перерізаний площиною NCDO1, що є перпендикулярною до площини проєкцій  $p_1$  і нахилена до осі Z під кутом λ. Параметр k визначається, як вказано після формули 1, тільки замість величини r тут слід застосувати  $r_{min}$ .

Отже по суті ми маємо геометричну побудову перетину конуса і передньої пласкої поверхні із загальним розміщенням (тобто із ненульовими значеннями переднього кута і кута нахилу різальної кромки різця).

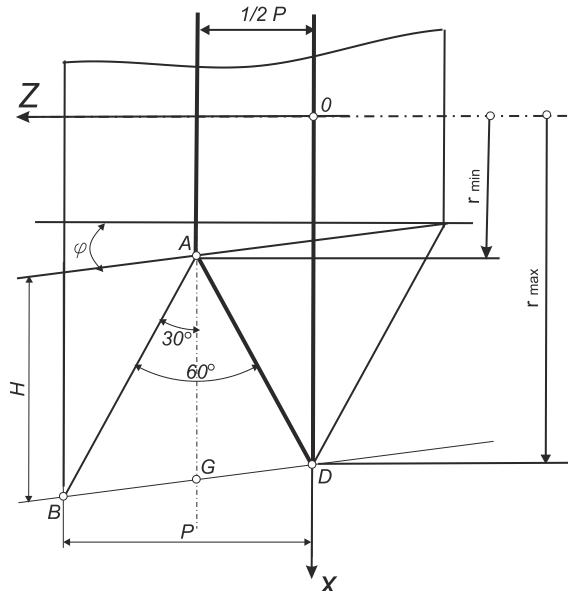


Рис. 3 – Схема профілю замкової нарізі у координатній площині ZOx

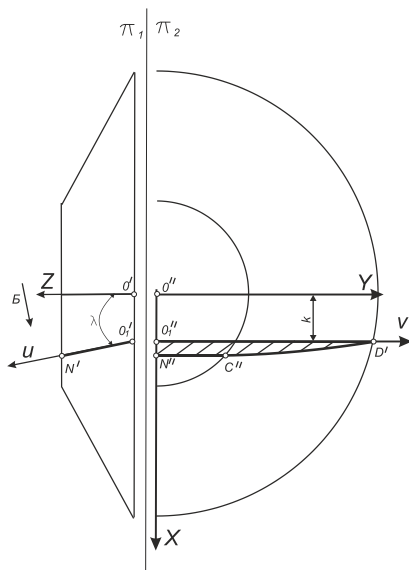


Рис. 4 – Комплексне креслення перерізу конічної поверхні площиною передньої поверхні різця

Оскільки теоретична гвинтова поверхня є поверхнею обертання і рівномірного переміщення конічної поверхні уздовж своєї осі то лінія CD на рисунку 5 є профілем цього перетину, тобто профілем різальної кромки різця у площині його передньої поверхні

вигляд Б

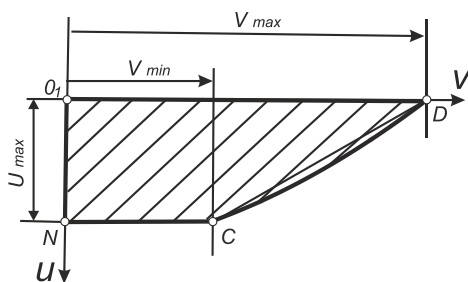


Рис. 5 – Бічний профіль різальної кромки різця для виконання нарізі

Оскільки вказаний профіль побудований у площині UV то аналітичний вигляд профілю заданий формулою 1. Лінія CD має гіперболічний вигляд, але оскільки роботами [5,6] доведено, що стріла опуклості цієї лінії щодо прямої яка проходить через її крайні точки сягає величини не більшої ніж 3мм то технологічно доцільно замість неї за різальну кромку приймати відрізок CD.

Згідно із [3] та рисунком 3 для розрахунку вказаних на рисунку 4 координат застосуємо такі формули:

$$v_{max} = \sqrt{r_{max}^2 - r_{min}^2}, \quad (4)$$

$$v_{min} = \sqrt{r_{min}^2 - \left(k + \frac{P}{2} \tan \lambda\right)^2}, \quad (5)$$

$$u_{max} = \frac{P}{2 \cos \lambda}, \quad (6)$$

де

$$k = r_{min} \sin \gamma$$

Визначення профільного кута різальної кромки даного інструмента можна отримати за формулою:

$$\alpha_1 = 2 \arctan \left( \frac{u_{max}}{v_{max} - v_{min}} \right), \quad (7)$$

За формалами 2-7 можна вести профілювання неповно профільного різця для виготовлення вказаних конічних нарізей.

**Висновки.**

1. Бічний прямолінійний профіль різальної кромки різця для точіння замкової нарізі, який залежить від величини статичного переднього кута у вершинній точці і кута підйому нарізі визначається за двома його крайніми точками за отриманими математичними виразами 2,3,4,5,6.

2. Профіль різальної кромки неповнопрофільного різця із ненульовими значеннями переднього кута і кута нахилу різальної кромки можна виконати за формулами 7 і 2,3,4,5,6.

3. Геометрична модель бічного профілю вказаної різальної кромки уможливує її використання для створення завершеного профілю одно чи багато ниткового повнопрофільного різця для виготовлення усіх типорозмірів замкових нарізей з диференційним підходом щодо величини передніх кутів.

У подальших дослідженнях, варто зосередитися на створенні програмного застосунку для автоматизованого розрахунку профілю різальної кромки вказаних різців.

**Список літератури**

1. ИСО 11961: 2008 Трубы стальные бурильные для нефтяной и газовой промышленности. Технические условия М.: Стандартинформ, 2010. — 164 с.
2. Онисько О.Р. Причины відмови від існуючої методики знаходження профілю різьбового токарного різця для виготовлення великорозмірних труб нафтогазового сортаменту [Текст]/О.Р.Онисько, Н.Р.Бажалук, П.В.Дякун//Прикарпатський вісник НТШ.–2015.– №1(29).–С.183–192.
3. Онисько О.Р. Визначення профілю різальної частини різця з подвійним нахилом передньої поверхні для формування трикут-

- ної різьби труб нафтогазового сортаменту. [Текст] / О. Р. Онисько, В.І.Патра, Б.Я.Прибуш // Нафтогазова енергетика.— 2015.— 2(24).—С. 77–81
4. ГОСТ 28487-90. Межгосударственный стандарт. Резьба коническая замковая для элементов буровых колонн. Профиль. Размеры. Допуски (с Изменением N 1 [Текст]. Утвержден и внесен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 05.06.80 № 2578. М.: «Стандартинформ», 2010. — 75с.
5. Онисько О.Р. Порівняльний аналіз графічних моделей бічних профілів трикутної різьби: заданого стандартом і отриманого за допомогою різця з ненульовим значенням переднього кута. [Текст]/О.Р.Онисько, П. М. Процак//Вісник НТУ «ХП».—2015.— №4 (1113), С.31–36.
6. Онисько О.Р. Програмна реалізація визначення величини опуклості гіперболічного профілю різьбового різця з ненульовим значенням переднього кута. [Текст]/О.Р.Онисько, О.В.Зубик/ Наукові нотатки/Міжвузівський збірник.—2015.— №48, С.159–166.
7. Фомин Е. В. Повышение стойкости и точности резьбовых резцов на основе моделирования процесса резбонарезания [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 Фомин Евгений Владимирович – М., 2007. – 206 с. – Библиогр.: с. 194–202.
8. Глембоцька, Л.Є. Проблеми обробки важкооброблюваних матеріалів. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки: Т.1/(Житомир 14 травня 2014р.) . – Ж. : ЖНТУ , 2015. – С. 9.
- dual tilt the front surface to form a triangular thread of the oil and gas pipes assortment] . Naftohazova enerhetyka.Publ., 2015., no. 2(24). pp. 77–81.
4. GOST 28487-90. Mezhhosudarstvennyy standart. Rez'ba konicheskaya zamkovaya dlya elementov buryl'nykh kolonn. Profyl'. Razmery. Dopusky (s Yzmeneniyem N 1 [Interstate standards. Conical thread lock for drill string elements. Profile. Dimensions. Tolerances]. Moscow. Standartynform Publ. , 2010. 75p.
5. Onys'ko O.R., Protsak P. M. Porivnyal'nyy analiz hrafichnykh modeley bichnykh profiliv trykutnoyi riz'by: zadanoho standartom i otrymanoho za dopomohoyu riztsya z nenul'ovym znachennyam peredn'oho kuta.[Comparative analysis of graphical models side triangular thread profiles: standard and set obtained using a cutter with a non-zero value of the front corner]. Visnyk NTU «KhPI», Publ., 2015., no. 4 (1113), pp. 31–36.
6. Onys'ko O. R. , Zubyk O.V. Prohramna realizatsiya vyznachennya velychyny opuklosti hiperbolichnoho profilu riz'bovoho riztsya z nenul'ovym znachennyam peredn'oho kuta. [Software implementation of the determination of the hyperbolic convexity profile threaded cutter with a non-zero value front angle]. Naukovi notatky/Mizhvuziv's'kyy zbirnyk., Publ., 2015., no. 48, pp.159–166.
7. Fomyn E. V. Povyshenye stoykosti y tochnosti rez'bovykh reztsov na osnove modelirovaniya protsessa rez'bonarezaniya [Increased durability and precision thread cutting tools based on simulation threading process]. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)). Moscow, 2007. 206 p.
8. Hlembots'ka, L.Ye. Problemy obrobky vazhkoobroblyuvanykh materialiv. Tezy Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi on-line konferentsiyi aspirantiv, molodykh uchenykh ta studentiv, prysvyachenoyi Dnyu nauky. [Problems of the hard processed material processing. Abstract of the All-Ukrainian scientific-practical conference on-line graduate students, young scientists and students, dedicated to the Science Day.(14 May 2014)]. Zhytomyr ZhNTU Publ. 2014, p. 9.
9. Ultra-rigid thread turning for all types of threads – internal and external. Sandvik Coromant. Site. – Available at: [http://www.sandvik.coromant.com/engb/products/corothread\\_266/Pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/engb/products/corothread_266/Pages/default.aspx). (accessed: 15.05.2015)

## Bibliography (transliterated)

- ISO 11961: 2008 Truby stal'nyye buryl'nye dlya neftyanoy u hazovoy promyshlennosti. Tekhnicheskyye usloviya [Petroleum and natural gas industries -- Steel drill pipe. Specifications]. Moscow. Standartynform Publ. , 2010. 164 p.
- Onys'ko O.R. , Bazhaluk N.R., Dyakun P.V. Prychyny vidmovy vid isnyuuchoyi metodyky znakhodzhennya profilu riz'bovoho to-karnoho riztsya dlya vyhotovlennya velykorozmirnykh trub nafto-hazovoho sortamentu [The reasons for rejection of the existing methods of the threaded profile turning tools for making large-scale oil and gas pipe assortment]. Prykarpat's'kyu visnyk NTSh., Publ., 2015, no. 1(29), pp.183–192.
- Onys'ko O.R., Patra V.I., V.Ya. Prybush. Vyznachennya profilu rizal'noyi chastyny riztsya z podviynym nakhyлом peredn'oyi pov-erkhni dlya formuvannya trykutnoyi riz'by trub naftohazovoho sortamentu. [Determining the profile of the cutting tool with

Поступила (received) 12.10.16

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Моделювання бічного профілю різальної кромки у залежності від геометричних параметрів різців призначених для виготовлення замкової нарізі / О. Р. Онисько // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 33 (1205). – С. 50–53. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079–004X.**

**Моделирование бокового профиля режущей кромки в зависимости от геометрических параметров резцов предназначенных для изготовления замковой резьбы. / О. Р. Онисько // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 33 (1205). – С. 50–53. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079–004X.**

**Modeling of the cutting edge side profile depending on the geometrical parameters of cutting tools for the manufacturing of tool-joint tapered thread. in machines / O. R. Onysko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.50–53. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.**

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Онисько Олег Романович** – канд. тех. наук, ІФНТУНГ, доцент кафедри компютеризованого машинобудівного виробництва, м.Івано-Франківськ; тел.: 0954885401, e-mail: onysko.oleg@gmail.com

**Онисько Олег Романович** – канд. тех. наук, ІФНТУНГ, доцент кафедри компютеризованого машиностроительного производства, г. Івано-Франковск; тел. 0954885401, e-mail: onysko.oleg@gmail.com

**Onysko Oleh Romanovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Associate Professor at the Department of computerized machine manufacture; tel.: 0954885401, e-mail: onysko.oleg@gmail.com.

УДК 621.9.044

*Г.И. КОСТЮК***ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5К5 ЗА СЧЕТ ОБРАБОТКИ ЛУЧЕМ ЛАЗЕРА, РАБОТАЮЩЕГО В ФЕМТОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ**

Проведено теоретичне дослідження дії фемтосекундних лазерів на швидкорізальну сталь Р6М5К5. Доведено реальну можливість отримання наноструктур і знаходження технологічних параметрів на основі дослідження полів температур, швидкостей росту температур, температурних напружень залежно від щільності теплового потоку лазерного випромінювання і часу його дії. Доведено можливість отримання наноструктур внаслідок дії температурних напружень, що перевищують  $10^{10}$  Па, а також внаслідок дії температур і швидкості їх зростання. Надано залежності об'єму зерна від технологічних параметрів та оцінено максимальну і мінімальну глибину залягання зерна від технологічних параметрів. Усе це дозволяє провести експрес оцінку параметрів для отримання нано зерна.

**Ключові слова:** фемтосекундний лазер, наноструктурне зерно, технологічні параметри, швидкорізальна сталь.

Проведено теоретическое исследование действия фемтосекундных лазеров на быстрорежущую сталь Р6М5К5. Доказаны реальная возможность получения наноструктур и нахождения технологических параметров на основе исследования полей температур, скоростей роста температур, температурных напряжений в зависимости от плотности теплового потока лазерного излучения и времени его действия. Показана возможность получения наноструктур вследствие действия температурных напряжений превышающих  $10^{10}$  Па, а также вследствие действия температур и скорости их роста. Даны зависимости объема зерна от технологических параметров и оценена максимальная и минимальная глубина залегания зерна от технологических параметров. Всё это позволяет провести экспресс оценку параметров для получения нанозерна.

**Ключевые слова:** фемтосекундный лазер, наноструктурное зерно, технологические параметры, быстрорежущая сталь.

A theoretical study of the effect femtosecond lasers W6Mo5Co5 speed steel. It shows the real possibility of finding nanostructures and process parameters based on the temperature fields of research, temperature stress increase speeds of thermal stresses depending on the density of the laser radiation and heat flow time of its action. The possibility of obtaining nanostructures due to the action of the temperature stress exceeding  $10^{10}$  Pa, and also due to the influence of temperature and the rate of their growth. Given the volume of grain, depending on the process parameters and estimate maximum and minimum depth of the grain on the technological parameters. all this allows a rapid assessment of the technological parameters for nanostructure.

**Keywords:** femtosecond laser, nanostructured grain, technological parameters, quickly cutting steel.

**Введение.** К сожалению, в настоящее время быстрорежущие стали практически не применяются на производстве, так как наиболее эффективная быстрорежущая сталь Р18 дорога из-за большого содержания вольфрама, а остальные показывают невысокую эффективность и работоспособность. Всё это приводит к тому, что все наработки по быстрорежущим сталям не используются в производстве. Как показано зарубежными авторами, использование фемтосекундных лазеров может приводить к существенному снижению коэффициента трения: для сухого – более чем в четыре раза, для жидкостного – более чем в два раза. К тому же обнаружено появление наноструктур при действии фемтосекундного лазера.

Наноструктуры обладают высокой микротвердостью, а, следовательно, могут снижать абразивный износ РИ. В то же время ряд наноструктур может обладать свойствами как органического вещества, так и неорганического, что может существенно повлиять на снижение коэффициента трения при наличии органических смазок в СОЖ. Всё это также показывает, что наноструктуры могут существенно повысить работоспособность и эффективность РИ.

**Состояние вопроса.** Фемтосекундный лазер имеет преимущество в том, что он способен обеспечить высокую плотность теплового потока при малой мощности лазера. Это значит, что средняя температура обработки будет невысокой и есть большая перспектива обработки только рабочей части режущего инструмента, что обеспечит экономическую целесообразность данного технологического процесса. Фемтосекундные лазеры используются для получения

регулярных структур на поверхности летательных аппаратов в целях обеспечения снижения вероятности обледенения в верхних слоях атмосферы.

Очевидно, что появление наноструктур на поверхности приведет к существенному изменению физико-механических характеристик, существенно повысится микротвердость, предел текучести и, вероятно, снизится модуль упругости, что позволит поверхности режущего инструмента выдерживать ударные нагрузки без потери геометрии режущего инструмента.

Для того чтобы эффективно получать наноструктуры, необходимо оценить параметры обработки фемтосекундным лазером. Теоретическому исследованию образования наноструктур в РИ посвящены монографии [1–7], обобщению результатов экспериментальных исследований – монографии [8–9], на основе которых и были предложены критерии образования наноструктур при действии лазерного излучения.

Для лазерного излучения можно применять такие критерии: достижение необходимых температур (500...1500 К), обеспечение скорости роста температуры, превышающей  $10^7$  К/с и обеспечение действия температурных напряжений  $10^8$ ... $10^{10}$  Па. Кроме этих критериев, очевидно, необходимо учитывать волновые процессы в материале вследствие различных эффектов. Это – взаимодействие световой волны с фонным газом в материале, с электронным газом в материале, а также движение термоупругой волны, которая обеспечит при высокой скорости волновое взаимодействие со световым потоком. Все эти волны,

© Г.И. Костюк, 2016

за счет интерференции, могут существенно усилить амплитуды волн и обеспечить высокие значения дополнительных давлений, что совместно с действием температурных напряжений может приводить непосредственно к образованию наноструктур.

Всё изложенное выше говорит о важности исследования вопроса создания режущего инструмента с наноструктурами, полученного в результате действия фемтолазера.

### Физика процессов при действии лазерного излучения на конструкционные материалы

**Особенности описания источника тепла при действии лазера на непрозрачные материалы.** В технологических целях используют фокусированный источник когерентного излучения, плотность теплового потока которого распределена в фокальной плоскости следующим образом:

$$q(r) = q_0 \left[ \frac{2I_1(Br)}{(Br)^2} \right]^2, \quad (1)$$

где  $I_1(Br)$  – функция Бесселя первого рода первого порядка;

$$B = I_1 D / \lambda F. \quad (2)$$

Здесь  $D$  – диаметр линзы;

$\lambda$  – длина волны излучения;

$F$  – фокусное расстояние;

$q_0$  – интенсивность в центре пятна, рассчитываемая по формуле

$$q_0 = \frac{I_1 D^2}{4\lambda^2 F^2} P_0, \quad (3)$$

где  $P_0$  – мощность излучения, поглощенная материалом.

Плотность теплового потока может быть получена от произведения функции, зависящей только от времени, и функции координат поверхности:

$$q_n(r, \tau) = A \varphi(\tau) q(r). \quad (4)$$

Здесь  $A$  – поглощательная способность обрабатываемого материала, зависящая в общем случае как от состояния поверхности (степени обработки, шероховатости), так и от ее температуры;

$q(r)$  – пространственное распределение мощности излучения, рассчитываемое по формуле (1) с учетом (2) и (3);

$\varphi(\tau)$  – описывает временную структуру импульса; например, для импульса лазера, работающего в пучковом режиме с упорядоченной генерацией, функция может быть представлена в виде

$$\varphi(\tau) = (1 - \cos \omega \tau). \quad (5)$$

Для огибающей пучков справедливо выражение

$$\varphi(\tau) = \tau^n \exp(br^m), \quad (6)$$

где  $n$  и  $m$  – некоторые числа (целые или дробные).

Модулирование добротности лазера позволяет получить моноимпульсы излучения длительностью  $\approx 10^{-8}$  с, временная структура которых может быть описана функцией, близкой к треугольной, крутизна переднего фронта может быть отлична от заднего.

Падающий на поверхность материала световой

поток частично отражается, а остальная часть его проходит внутрь объема тела и поглощается. Внутри и на поверхности тела действует тепловой источник, распределенный в пространстве и времени.

Плотность поглощенного теплового потока практически для всех технологических применений лазера изменяется внутри объема материала по закону Бугера

$$q_V(z) = q_{V_0} (1 - R) e^{-\alpha z}, \quad (7)$$

где  $q_V(z)$ ,  $q_{V_0}$  – соответственно объемные плотности теплового потока излучения на расстоянии  $z$  и на поверхности, Вт/см<sup>3</sup>;

$$q_{V_0} = \frac{q_n(r, \tau)}{0,1\delta}. \quad (8)$$

Здесь  $\delta \approx 10^{-4} \dots 10^{-5}$  м – слой, в котором световой поток поглощается при взаимодействии с электронами проводимости;

$R$  и  $\alpha$  – соответственно отражательная способность и коэффициент поглощения света.

**Модель взаимодействия светолучевых потоков и конструкционных материалов.** С учетом действия объемного источника и облучения, объемная плотность которого рассчитывается по выражению (7) с учетом (8) и поверхностного источника тепла с плотностью теплового потока по выражению (4) с учетом (5), (6), решаются уравнения теплопроводности.

#### Баланс тепла в элементарном объеме детали.

Баланс тепла представлен выражением

$$\begin{aligned} C[T] \gamma [T] \frac{dT(x, y, z, t)}{dt} + C[T] \gamma [T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} V_n + C[T] \gamma [T] \frac{d^2 T(x, y, z, t)}{dt^2} = \\ = \nabla \lambda [T] \nabla T(x, y, z, t) + C[T] \gamma [T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} - AL_{пл} \gamma [T] \frac{dV_{nz}}{dt} + \\ + B \frac{q_n(r, \tau)}{0,1\delta} \pm D \frac{dW(x, y, z, t)}{dt} \pm m_a C_a [T_a] \frac{dn_a}{dt} (T_a - T(x, y, z, t)) \pm \\ \pm P_{T,x,p}(n_A, n_B, T, t_e) \frac{dn_{A(B)}}{dt} L_{T,x,p} + q_V(z) \end{aligned} \quad (9)$$

где  $C[T]$  и  $\gamma [T]$  – теплоемкость и плотность материала мишени, соответствующие температуре  $T$ ;

$\tau_p$  – время релаксации температуры на один Кельвин;

$V_n$  – скорость перемещения плазменного потока лазерного излучения или мишени относительно него;

$L_{пл}$  и  $L_{T,x,p}$  – удельные теплота плавления и термохимической реакции;

$V_\phi [T]$  – скорость смещения фронта испарения;

$V_{nl}$  – объем расплавленного металла;

$W(x, y, z, t)$  – энергия деформирования единичного объема мишени;

$m_a$  – масса диффундирующего атома;

$C_a [T_a]$  – теплоемкость диффундирующего материала при температуре  $T_a$ ;

$P_{T,x}(n_A, n_B, T, t_{B3})$  – вероятность термохимической реакции, зависящая от концентрации реагентов  $n_A$  и  $n_B$ , температуры  $T$  и времени взаимодействия  $t_{B3}$ ;

$n_A$  и  $n_B$  – концентрация реагентов, определяющих возможность реакции.

Изменение количества тепла в единичном объеме (первое слагаемое в левой части равенства) реализуется перемещением потока лазерного излучения вдоль обрабатываемой поверхности или перемещени-

ем мишени относительно потока лазерного излучения со скоростью  $V_n$  (второе слагаемое); теплофизических процессов: влияния на теплообмен конечной скорости распространения тепла (третье слагаемое), теплопроводности (первое слагаемое справа), смещения фронта испарения (второе слагаемое), плавления (третье слагаемое); столкновительных процессов: объемного источника тепла вследствие действия лазерного излучения (четвертое слагаемое), термоупругих, термопластических и термоусталостных процессов, определяющих энергию деформирования материала элементарного объема (пятое слагаемое); диффузионных процессов, определяющих теплоперенос диффундирующим материалом (шестое слагаемое); термохимических процессов, связанных с реализацией химических реакций между материалом детали и материалом покрытия или же между компонентами сплавов и композитных материалов, объемного источника тепла вследствие действия светолучевого потока.

Теперь рассмотрим подробнее, как рассчитать каждое значение в формуле (9). Используя дискретные значения теплоемкости при различной температуре, зависимость теплоемкости от температуры можно выразить эмпирической формулой

$$c[T] = (a + b(T - 273) + c(T - 273)^2) \cdot 4186,8, \quad (10)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1 для различных материалов.

Для определения зависимости изменения плотности материала от температуры можно также пользоваться эмпирической формулой

$$\rho[T] = d - e(T - 273), \quad (11)$$

где  $d$  и  $e$  – коэффициенты, выбираемые в зависимости от материала. Так, например, для хромистых нержавеющей сталей 1X13, 2X13, 3X13 и 4X13  $d = 7700$ ,  $e = 0,286$ , а для аустенитных хромоникелевых сплавов X18H9 и X18H25C2 –  $d = 7920$ ,  $e = 0,410$ .

Таблица 1 – Коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  для расчета теплоемкости в выражении (10)

Материал	$a$	$b \cdot 10^4$	$c \cdot 10^8$
Для чистых металлов			
Al	0,214	1	0
W	0,032	0,047	0
Fe	0,105	0,8	0
Cu	0,0926	0,208	0
Mo	0,0603	0,14	0
Ni	0,1023	1,12	0
Ti	0,13	0,53	0
Для хромистых нержавеющей сталей		Для сталей (1X13, 4X13)	
X18H9	0,1095	0,193	6
X18H25C2	0,117	0,58	2,1

В случае, когда поток лазерного излучения не перемещается вдоль поверхности мишени, второе слагаемое слева в формуле (9) обращается в нуль. Если же имеется перемещение потока параллельно обрабатываемой поверхности, то  $V_n$  – это скорость по координате  $y$ .

В третьем слагаемом слева учитывается конечная скорость распространения тепла. Время релаксации тепловых колебаний можно вычислить по форму-

ле

$$\tau_p = \frac{\eta}{G}, \quad (12)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости (внутреннего трения);  $G$  – модуль упругости второго рода (модуль сдвига), его можно вычислить из модуля упругости первого рода:

$$G = E/2(1 + \mu),$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

Так, например, для железа  $\eta = 14 \cdot 10^9$  кг/(м · с),  $G = 4,6 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, откуда  $\tau_p \approx 3 \cdot 10^{-3}$  с; для алюминия  $\eta = 1,25 \cdot 10^9$  кг/(м · с),  $G = 6,85 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\mu = 0,365$ , откуда  $\tau_p = 2,67 \cdot 10^{-4}$  с.

В первом слагаемом справа учтено изменение количества тепла за счет теплопроводности. Зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda$  от температуры в каждый момент времени представляется эмпирическими зависимостями, различными для различных материалов. Для аустенитных хромоникелевых сплавов зависимость  $\lambda$  от  $T$  дана в виде

$$\lambda = (13,3 - a + (1,1 + b) \cdot 2(T - 273)) \cdot 1,163, \quad (13)$$

где  $a = 10(\sigma - 0,5)$ ;  $b = 1,15(\sigma - 0,5)$ ;

$$\sigma = C / 12 + Si / 28 + Mn / 55 + Cr / 52 + Ni / 59 + W / 184 + Nb / 93 + Mo / 96.$$

Здесь вместо названия элемента подставляется процентное значение содержания данного элемента в сплаве. Так, для стали X18H9(ЭЯ-1)

$$\sigma = 0,14 / 12 + 0,8 / 28 + 2 / 55 + 18 / 52 + 10 / 59 = 0,592$$

тогда,  $a = 0,92$ ,  $b = 0,1058$ .

Для чистых металлов можно воспользоваться аппроксимацией табличных значений справочников. На графиках рис. 1 нанесены значения теплопроводности в зависимости от температуры. Из рисунка видно, что приближенно аппроксимировать эту зависимость можно линейной функцией вида

$$\lambda = -cT + e. \quad (14)$$

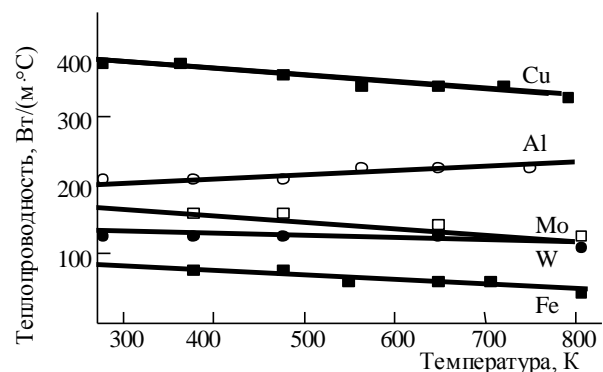


Рис. 1 – Зависимость теплопроводности от температуры материала

Для вычисления коэффициентов  $c$  и  $e$  можно воспользоваться программой аппроксимации табличных значений методом наименьших квадратов для степенной функции. Для данной функции размер базиса равен единице. Значения коэффициентов приведены в табл. 2.

Видно, что из этих материалов только у алюминия с ростом температуры понижается теплопроводность, у остальных она растет.



Таблиця 2 – Значения коэффициентов  $c$  и  $e$  в формуле (14)

Материал	$c$	$e$
Al	-0,0512	209,34
W	0,0785	159,33
Fe	0,0978	94,203
Mo	0,0291	140,72

Во втором слагаемом справа формулы (9), учитывая смещение фронта испарения, скорость испарения материала  $V_{исп}$  при температуре, меньшей температуры плавления материала детали (ленгмюровский механизм), рассчитывается по формуле Дэшмана

$$V_{tm} = \frac{10^4}{\gamma_m} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \left( \exp\left(A - \frac{B}{T}\right) - P_{ост} \right), \quad (15)$$

где  $A$  и  $B$  – табулированные константы, значения которых приведены в табл. 3;  $R$  – газовая постоянная;  $\gamma_m$  – плотность материала детали;  $M$  – молекулярный вес материала детали;  $P_{ост}$  – остаточное давление газов.

Таблиця 3 – Коэффициенты  $A$  и  $B$  в выражении (15)

Материал	Cu	Al	Ti	Zr
$A$	11,69	11,79	12,50	12,33
$B \cdot 10^{-3}$	16,98	110,94	23,22	30,26
Материал	Mo	W	Fe	–
$A$	11,64	12,40	12,44	–
$B \cdot 10^{-3}$	30,85	40,68	19,97	–

При испарении из слоя расплавленного металла (френкелевский механизм) скорость испарения определяется по формуле

$$V_{\phi} = V_0 \exp\left(\frac{T^*}{T(O, x, y, z, t)}\right), \quad (16)$$

где  $V_0$  и  $T^*$  – критические скорость испарения и температура поверхности.

Для определения этих величин воспользуемся аппроксимацией графиков зависимости  $V_0$  и  $T^*$  от плотности теплового потока  $q$ , показанных на рис. 2. Для хорошей аппроксимации подходит квадратичная функция, коэффициенты которой можно определить по программе аппроксимации функции со степенным базисом по методу наименьших квадратов. На графиках значения  $q$  и  $V_0$  указаны по логарифмической шкале, поэтому воспользуемся такими подстановками:

$$V_0 = 10^{s-3}; \quad q = 10^{s+8}; \quad \Rightarrow \quad S = \lg q - 8. \quad (17)$$

Величину плотности теплового потока  $q$  можно определить по формуле (4).

Зависимости  $V_0$  и  $T^*$  от  $q$  через вспомогательные переменные имеют такой вид:

$$\begin{aligned} Z &= (nS^2 + kS + p) \cdot 10^{-1}; \\ T^* &= (mS^2 + rS + f) \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Коэффициенты в формулах (18) для различных материалов приведены в табл. 4.

В третьем слагаемом справа формулы (9) учитывается изменение количества тепла при плавлении и рассчитывается для того объема материал  $V_{пл}$ , в котором рассчитываемая температура превышает температуру плавления.

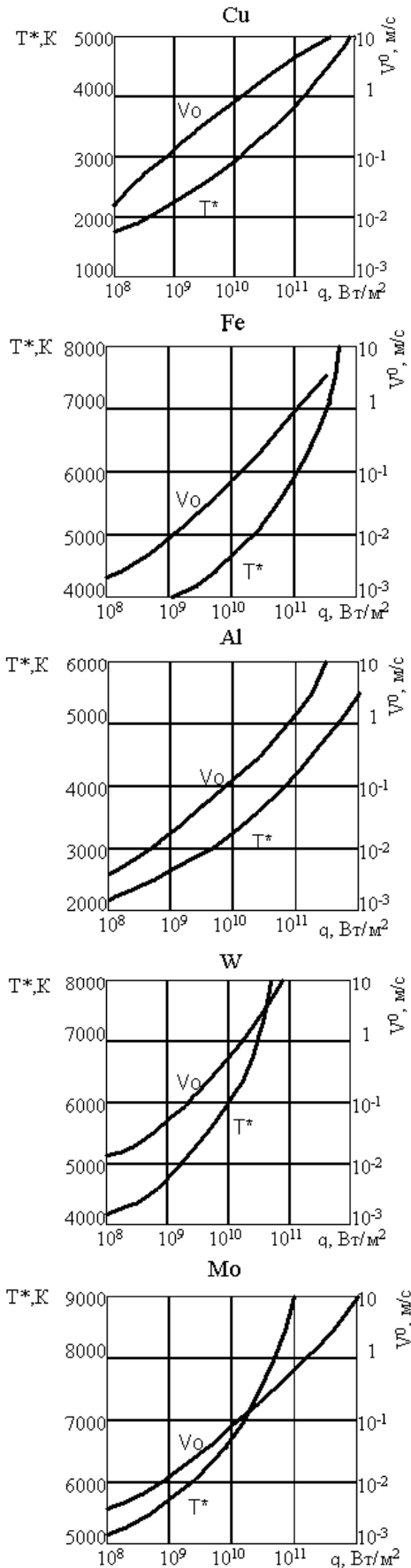


Рис. 2 – Графики зависимостей значений  $T^*$  и  $V_0$  в формуле (18) от плотности теплового потока для ряда материалов

Таблица 4 – Коэффициенты  $n, k, p, m, r, f$  в формуле (18)

Материал	$n$	$k$	$p$
Al	1,619	3,0952	8,8571
W	1,7143	10,2857	9,9997
Fe	1,751	3,2502	10,5021
Mo	0,8928	4,7321	10,9731
Cu	-0,0858	1,1319	1,0605
Материал	$m$	$r$	$f$
Al	1,4048	2,5833	3,2321
W	3,2857	3,4428	1,8032
Fe	3,2849	-1,9286	37,942
Mo	4,5357	-1,6752	53,652
Cu	0,8451	3,9713	19,116

Удельную теплоту плавления  $L_{пл}$  можно вычислить по формуле

$$L_{пл} = nT_{пл}f(T_{пл}) \cdot 4186,8, \quad (19)$$

где  $n$  – число атомов в молекуле;  $f(T_{пл})$  – функция зависимости  $L_{пл}$  от  $T_{пл}$ , которую приближенно можно выразить как линейную зависимость вида

$$f(T_{пл}) = (1,57T_{пл} + 1428) \cdot 10^{-3}. \quad (20)$$

Например, для железа  $f(T_{пл}) = 3,5$  кал/г. Удельная теплота плавления  $L_{пл}$  в формуле (12) измеряется в калориях на грамм.

В четвертом слагаемом формулы (9) вычисляется изменение количества тепла вследствие действия лазерного излучения как объемного источника тепла.

Пятое слагаемое формулы (9) учитывает энергию, затрачиваемую на деформирование тела за время действия теплового источника  $t_u$ , и возвращаемую материалу энергию при релаксации напряжений (за время, большее  $t_u$  и меньшее  $t_u + \tau_p$ ). На рис. 3 показано значение коэффициента  $D$  в различные моменты времени.

Энергию деформирования единичного объема определим по формуле

$$W = G \left[ \frac{\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}{1-\mu} - \frac{2(1+\mu)\alpha_1}{1-2\mu} \ell(T(x, y, z, t) - T) \right], \quad (21)$$

где  $2\varepsilon_{ik} = 2\varepsilon_{ki} = \frac{\partial u_k}{\partial x} + \frac{\partial u_i}{\partial x}$  ( $k, i = x, y, z$ );

$\ell = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ ;

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  – удлинения;

$\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$  – сдвиги относительно соответствующих осей;

$u_x, u_y, u_z$  – перемещения относительно соответствующих осей;

$\alpha_1$  – коэффициент линейного расширения материала мишени;

$\mu$  – коэффициент Пуассона (отношение поперечной деформации к продольной, значения  $\mu$  заключены между 0,1 и 0,5);

$G$  – модуль сдвига (модуль второго рода) (для железа  $G = 3,5 \dots 10,3 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>,  $\mu = 0,23 \dots 0,31$ );

$T_u$  – начальная температура.

Зависимость коэффициента линейного расширения материала от температуры аппроксимируется линейной функций вида

$$\alpha_1[T] = v + w(T - 273) \quad (10^6 / 1^\circ\text{C}), \quad (22)$$

где  $v$  и  $w$  – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 5.

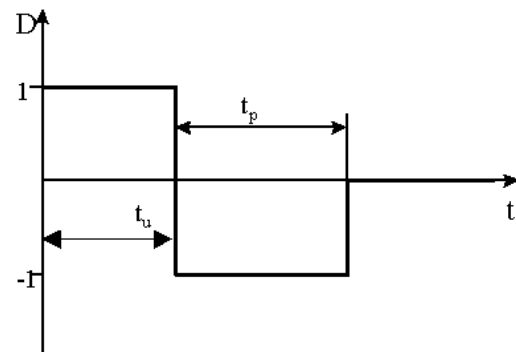


Рис. 3 – Значения коэффициента  $D$  в разные моменты времени

Таблица 3 – Коэффициенты  $V$  и  $W$  в выражении (22)

Элемент	Al	W	Fe	Cu
$v$	22,6	4,3	11,3	16,7
$w \times 10^9$	8,8	0,71	8,6	3,6
Элемент	Mo	Ni	Ti	–
$v$	10,1	13,4	7,7	–
$w \times 10^9$	0,965	1,0	3,8	–

Деформации сдвигов  $\varepsilon_{ik}$  не могут задаваться произвольно, они связаны дифференциальными соотношениями – условиями совместности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial y \partial z}; \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xz}}{\partial x \partial z}; \end{aligned} \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ -\frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} \right];$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x \partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ -\frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} \right];$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y \partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ -\frac{\partial \varepsilon_{yx}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial y} \right].$$

Этими условиями проверяется правильность определения удлинений и сдвигов, а их корректировка – вводом дополнительных напряжений.

Для определения удлинений  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  и сдвигов  $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$  воспользуемся выражением термоупругого потенциала перемещений  $\Phi$ :

$$\Delta \Phi - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \frac{\gamma}{G} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha_1 [T(x, y, z, t) - T_u], \quad (24)$$

где  $\gamma$  – плотность материала мишени.

Учитывая, что решение задачи проводится в подвижной системе координат и при выходе на стационарный или близкий к нему режим, второе слагаемое в левой части уравнения (24) становится незначительным, получим:

$$\Delta\Phi = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha_1 [T(x, y, z, t) - T_n]. \quad (25)$$

По величине термоупругого потенциала перемещений и по известным соотношениям находим величины удлинений и сдвигов:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial a \partial k}, \quad (i, k = x, y, z). \quad (26)$$

Величины температурных напряжений определим по выражению

$$\sigma_{ik} = 2G \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial a \partial k} - \Delta\Phi \cdot \delta_{ik} \right), \quad (27)$$

где  $\delta_{ik}$  подчиняется условиям:  $\delta_{ik} = 0$  при  $i \neq k$  ( $i, k = x, y, z$ );  $\delta_{ik} = 1$  при  $i = k$ .

В седьмом слагаемом формулы (9), учитывающем теплоперенос диффундирующим материалом, масса диффундирующего атома определяется по формуле

$$m_a = Mm_p, \quad (28)$$

где  $M$  – атомный вес наносимого материала;  $m_p$  – масса протона.

Изменение концентрации диффундирующих атомов в единицу времени можно определить по таким выражениям:

– при  $at < t_k$ :

$$\frac{dn_a}{dt} = \frac{ja}{ez\sqrt{\alpha\tau}};$$

– при  $at \geq t_k$ :

$$\frac{dn_a}{dt} = \frac{j}{ezL_D}, \quad (29)$$

где  $j$  – плотность тока вносимых атомов;  $e$  – заряд электрона;

$z$  – зарядовое число наносимого материала;  $L_D$  – толщина детали;

$t_k$  – время, за которое деталь прогреется на всю

толщину,  $t_k = \frac{L_D^2}{\alpha}$ ;

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности.

Формула для расчета коэффициента диффузии имеет вид

$$K_{diff} = a_d d_3^2 V_0 \exp(-U/(kT)), \quad (30)$$

где  $a_d$  – множитель порядка 0,1, определяемый типом кристаллической решетки;

$d_3$  – расстояние между ближайшими эквивалентными положениями вакансий в кристалле;

$V_0$  – величина порядка частоты атомных колебаний в кристалле ( $10^{12} \dots 10^{14} \text{ c}^{-1}$ );

$U$  – потенциальный барьер, который необходимо преодолеть вакансии при смещении в соседнее положение;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура.

Восьмое слагаемое формулы (9) учитывает влияние химических процессов на баланс тепла в мишени. При взаимодействии лазерного излучения с веществами, состоящими из многоатомных молекул, возможен целый цикл химических превращений, таких, как возбуждение молекулы с последующей диссоциацией (разложением) ее на активные частицы (ионы);

перегруппировка атомов в структуре молекулы; перемещение отдельных атомов из одной части конфигурации молекулы в другую; присоединение к возбужденной молекуле другой молекулы; передача энергии возбуждения от одной молекулы к другой; захват электронов с образованием отрицательных ионов; рекомбинация иона с электроном или иона с молекулой. Концентрация химических превращений в первом приближении прямо пропорциональна плотности поглощенной энергии и химическому выходу (среднее число химических превращений при поглощении единичной энергии). В результате химических реакций между ионами и радикалами плазмообразующего газа и атомами материала возможно удаление материала в виде летучих соединений, что используется при плазмохимическом травлении (так, добавление к аргону 10 % кислорода может увеличить скорость удаления материала вследствие химических реакций в 10–15 раз). Скорости плазмохимического травления составляют 2...10 нм/с. При обработке элементов W, Te, Mo, Ta фторсодержащими газами образуются летучие фториды, а при обработке Al хлорсодержащими газами – летуче хлориды. Термо- и плазмохимические реакции также могут способствовать увеличению массы и объема обрабатываемой детали из-за образования химических соединений с реакционным газом. Лазерное облучение в атмосфере химически активного газа либо в смеси инертного и химически активного газов, например  $O_2$ ,  $Ar + N_2$ ,  $Ar + N_2$  и т.п., сопровождается процессами, обеспечивающими рост пленки химического соединения: реакция между химически активными ионами А и атомами мишени В с последующим переносом молекул АВ на подложку; реакция между атомами и ионами химически активного газа А,  $A^+$ ,  $A^-$  и атомами наносимого покрытия; реакция между атомами и ионами А,  $A^+$ ,  $A^-$  и распыленными частицами В в газовой фазе с последующим осаждением молекул АВ на поверхности мишени.

Когда лазерному облучению подвергается многокомпонентное вещество АВ (химическое соединение, сплав), в установившемся процессе отношение поверхностных концентраций будет таким:

$$\frac{n_A(0)}{n_B(0)} = \frac{n_{A,V}}{n_{B,V}} \left( \frac{M_A}{M_B} \right)^{1/4}, \quad (31)$$

где  $n_{A,V}$  и  $n_{B,V}$  – концентрации атомов А и В объеме мишени.

Происходит обогащение приповерхностного слоя более тяжелым компонентом.

Если рабочее вещество непрерывно поступает на поверхность и разлагается там под действием облучения, то в простейшем случае скорость изменения поверхностной концентрации вступивших  $N_1$  и не вступивших  $N_2$  в реакцию молекул соединения будет определяться уравнениями

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{N_0 \sigma_p J_e}{e}, \quad (32)$$

$$\frac{dN_0}{dt} = n_0 - \frac{N_0}{\tau_0} - \frac{dN_1}{dt}, \quad (33)$$

где  $\sigma_p$  – сечение реакции, зависящее от свойств соединения и энергии лазерного излучения;

$n_0$  – число молекул, поступающих на единицу площади поверхности в единицу времени;

$\tau_0$  – среднее время, в течение которого непрореагировавшие молекулы находятся на поверхности до испарения.

Проинтегрировав систему уравнений (27)–(33) в случае малого потока  $n_0$ , получаем

$$N_0(t) = n_0 \sigma_h \tau_0 J_e (e + \sigma_h \tau_0 J_e)^{-1}. \quad (34)$$

Здесь введено обозначение  $\frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{\sigma_p J_e}{e}$ , а

$N_0(t)$  – начальная концентрация молекул в момент включения лазерного облучения при  $t = 0$ . Через промежуток времени  $t \gg \tau_1$  установится равновесная концентрация, равная  $n_0 \tau_1$ , и реакция будет протекать с постоянной скоростью

$$dN_1 / dt = n_0 \sigma_p \tau_0 J_e (e + \sigma_p \tau_0 J_e)^{-1}. \quad (35)$$

В общем случае эта скорость зависит от всех параметров процесса ( $E_e$ ,  $J_e$ ,  $T$ ,  $n_0$ ), однако если реакция проводится при достаточно низких  $T$  и высоких  $J_e$ , так что  $\sigma_p \tau_0 J_e \gg 1$ , то скорость реакции определяется только скоростью поступления адсорбата и для малого значения  $n_0$  не очень высока. При высоких плотность потока  $n_0$ , достаточных для создания более толстого покрытия, чем монослой, скорость реакции определяется только режимом облучения и не зависит от  $n_0$  и  $T$ :

$$dN_1 / dt = N_0 \sigma_p J_e / e \text{ при } n_0 \tau_1 \gg N_0. \quad (36)$$

**Теплообмен на поверхности детали.** Тепловой поток на поверхности мишени создается за счет следующих факторов:

- столкновительные процессы: тепло, выделяемое на поверхности из-за действия лазерного излучения (первое слагаемое справа), теплового потока, отводимого с термоэлектронами (второе слагаемое), и вторичными фотонами (третье слагаемое);

- теплофизические процессы: отвод теплового потока с испаренным материалом (четвертое слагаемое), ушедшим материалом в жидкой фазе, если создаются условия для его выброса (пятое слагаемое), тепловым излучением нагретой поверхности (шестое слагаемое) и конденсированными атомами, ранее испаренными (седьмое слагаемое);

- плазмохимические процессы, реализующиеся вследствие реакций потока лазерного излучения с испаренным материалом детали или адсорбированными газами (восьмое слагаемое); эта энергия передается излучением.

Передача энергии осуществляется также излучением потока квантов лазерного излучения (последнее слагаемое):

$$-\lambda [T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = F_{e,r} - F_{m\sigma} - F_{\text{эп}} - F_{\text{исп}} - F_m - \alpha \varepsilon T(0, y, z, t) \pm F_{\text{конд}} + F_{\text{пх}} + \alpha \varepsilon_c T_c, \quad (37)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана;

$\varepsilon$  и  $\varepsilon_c$  – степень черноты поверхности мишени и среды;

$T_c$  – температура среды.

Рассмотрим более подробно каждое слагаемое в формуле (37).

Плотность теплового потока вследствие действия лазерного излучения

$$F_{\text{ли}} = \frac{I_e D^2}{4\pi \lambda^2 F^2} P_0. \quad (38)$$

Второе слагаемое учитывает отвод теплового потока в результате испускания электронов нагретой поверхностью мишени – термоэлектронной эмиссии. Плотность теплового потока, отводимого с электронами,

$$F_{T\text{э}} = J_{\text{э}} \varphi(T), \quad (39)$$

где  $\varphi(T)$  – работа выхода электрона, эВ, при температуре поверхности  $T$ ;

$J_{\text{э}}$  – плотность эмиссионного тока, которая определяется с помощью уравнения Ричардсона

$$J_{\text{э}} = (1 - \bar{r}) A \cdot T^2 \cdot \exp(-e\varphi_0/kT). \quad (40)$$

Здесь  $\bar{r}$  – усредненный по энергиям электронов коэффициент отражения от потенциального барьера на границе «твердое тело – вакуум», он может достигать нескольких процентов для чистых металлов;

$A$  – постоянная Ричардсона,

$$A = 4\pi m_e k^2 e / h^3 = 1,204 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2(\text{К})^2;$$

$\varphi_0$  – работа выхода электрона при  $T = 273 \text{ К}$ ;

$k$  – постоянная Больцмана.

Для большинства металлов  $\varphi$  лежит в диапазоне 4...5 эВ

#### Результаты исследований и их обсуждение

Проводились исследования зависимости максимальной температуры от плотности теплового потока в фемтосекундном лазере, что позволит найти технологические параметры лазера, при которых возможно появление наноструктур. Исследовались зависимости скорости изменения температур в зоне лазерного излучения и зависимости температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения как от плотности теплового потока, так и времени действия излучения. В дальнейшем с учетом критериев образования наноструктур определялся объем нанозерна, полученного при действии лазерного излучения, по которому, оценив критический объем, соответствующий зерну в 100 нм (граничный размер наноструктуры), были определены технологические параметры лазера, обеспечивающие получение наноструктур.

Теперь рассмотрим подробнее. На рис. 4 показаны зависимости максимальных температур в зоне действия лазерного излучения на быстрорежущую сталь Р6М5К5 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия  $10^{-16} \dots 10^{-10}$  с. Видно, что с уменьшением времени действия лазерного излучения есть большая вероятность получения наноструктур.

Результаты исследования скорости роста температуры в зоне действия лазерного излучения от плотности теплового потока на различных глубинах при временах действия  $10^{-16} \dots 10^{-10}$  с для всех режимов показали, что практически во всем исследованном диапазоне плотностей токов и времени действия лазерного излучения реализуются скорости роста температур значительно выше, чем необходимо для получения наноструктур (превышает  $10^7 \text{ К/с}$ , рис. 5).

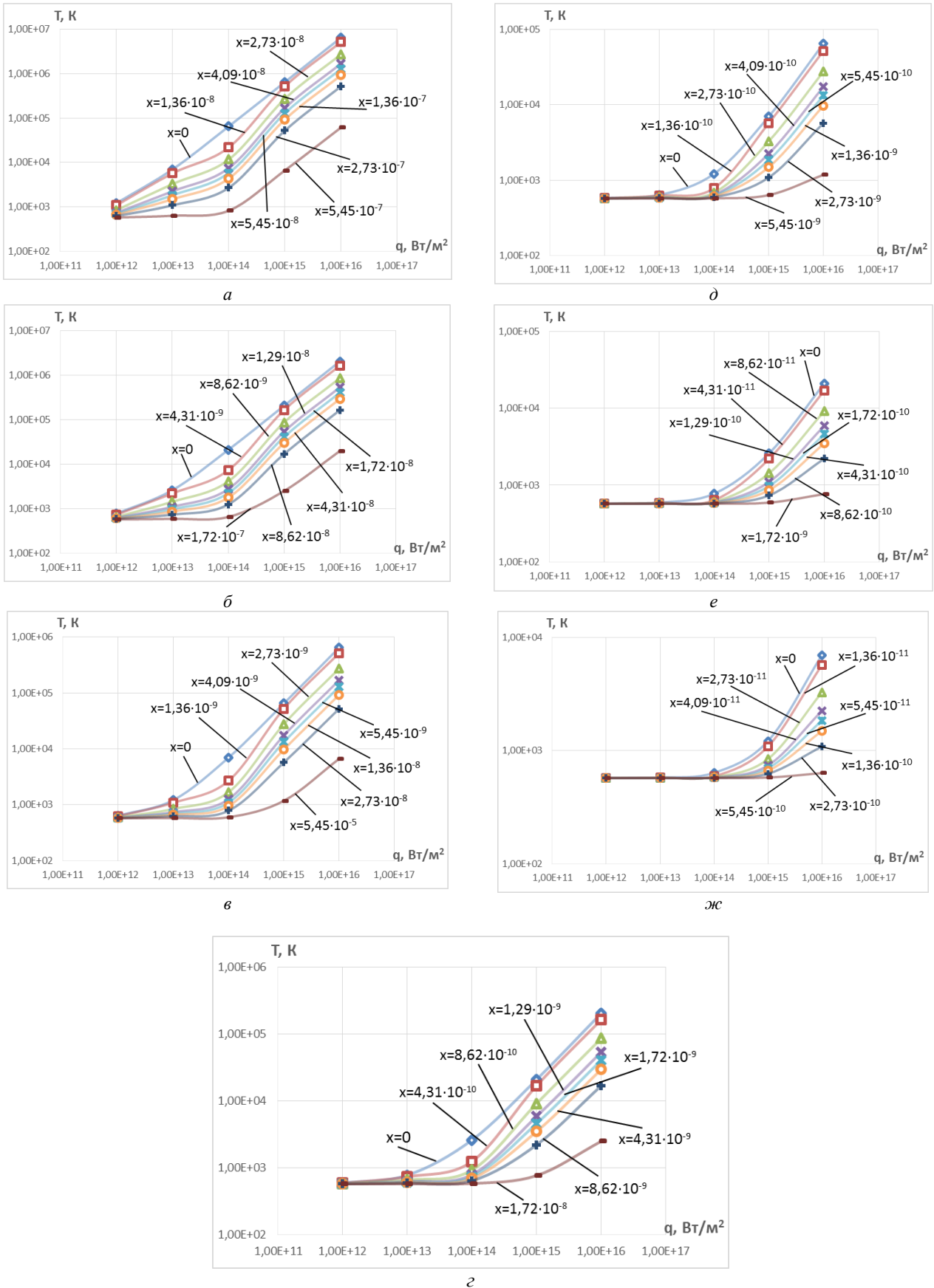


Рис. 4 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на Р6М5К5 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия:  
 а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с;  
 д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

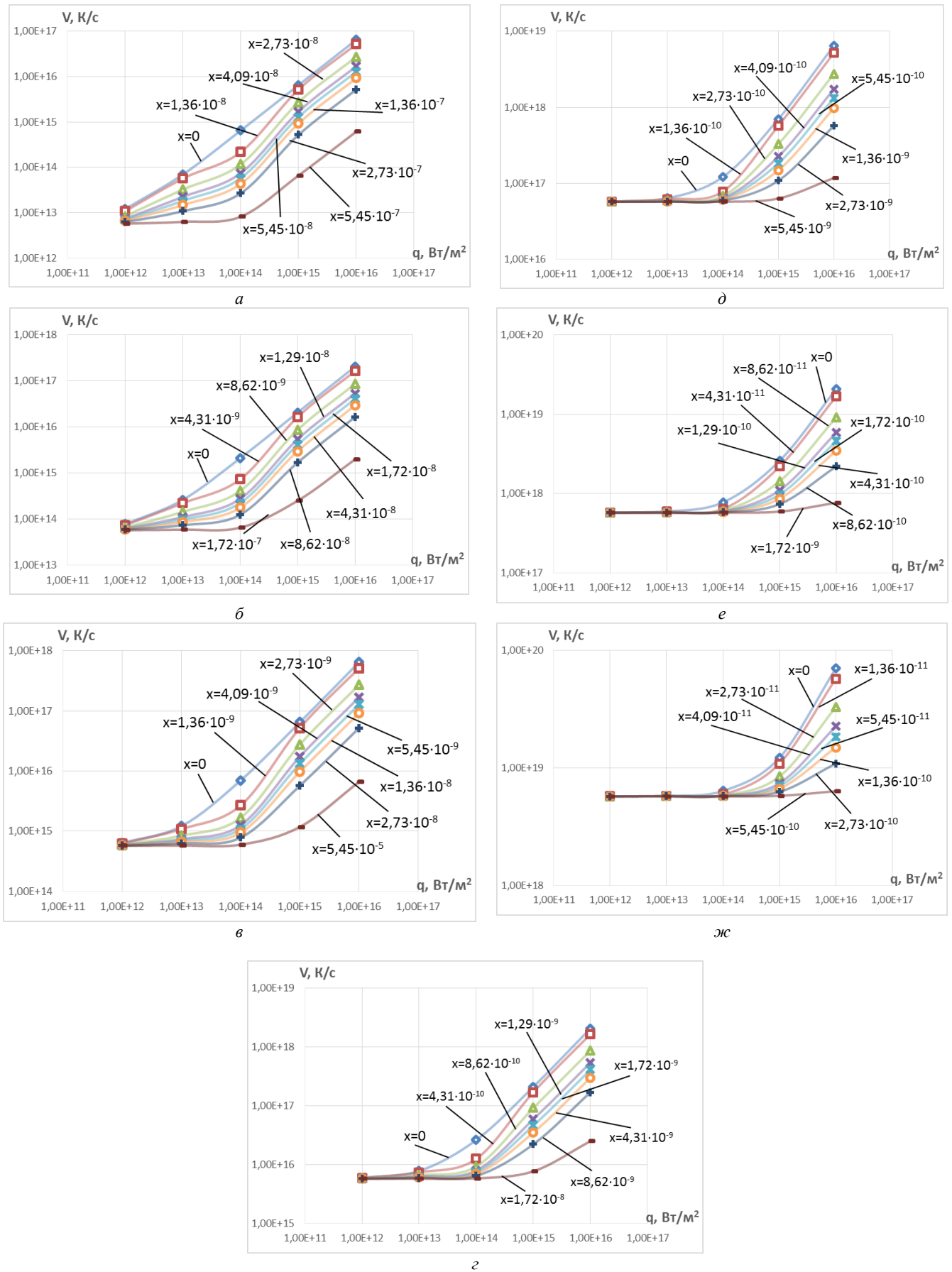


Рис. 5 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на P6M5K5 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

Зависимости температурных напряжений на разных глубинах от плотности теплового потока при времени его действия  $10^{-16} \dots 10^{-10}$  с показаны на рис. 6. Видно, что величины температурных напряжений могут быть достаточны для образования наноструктур из-за деформирования при больших временах

его действия  $10^{-11} \dots 10^{-13}$  с, т. е. в этом случае не обязательно иметь требуемый диапазон температур, а наноструктуры будут образовываться вследствие действия температурных напряжений в ортогональных плоскостях.

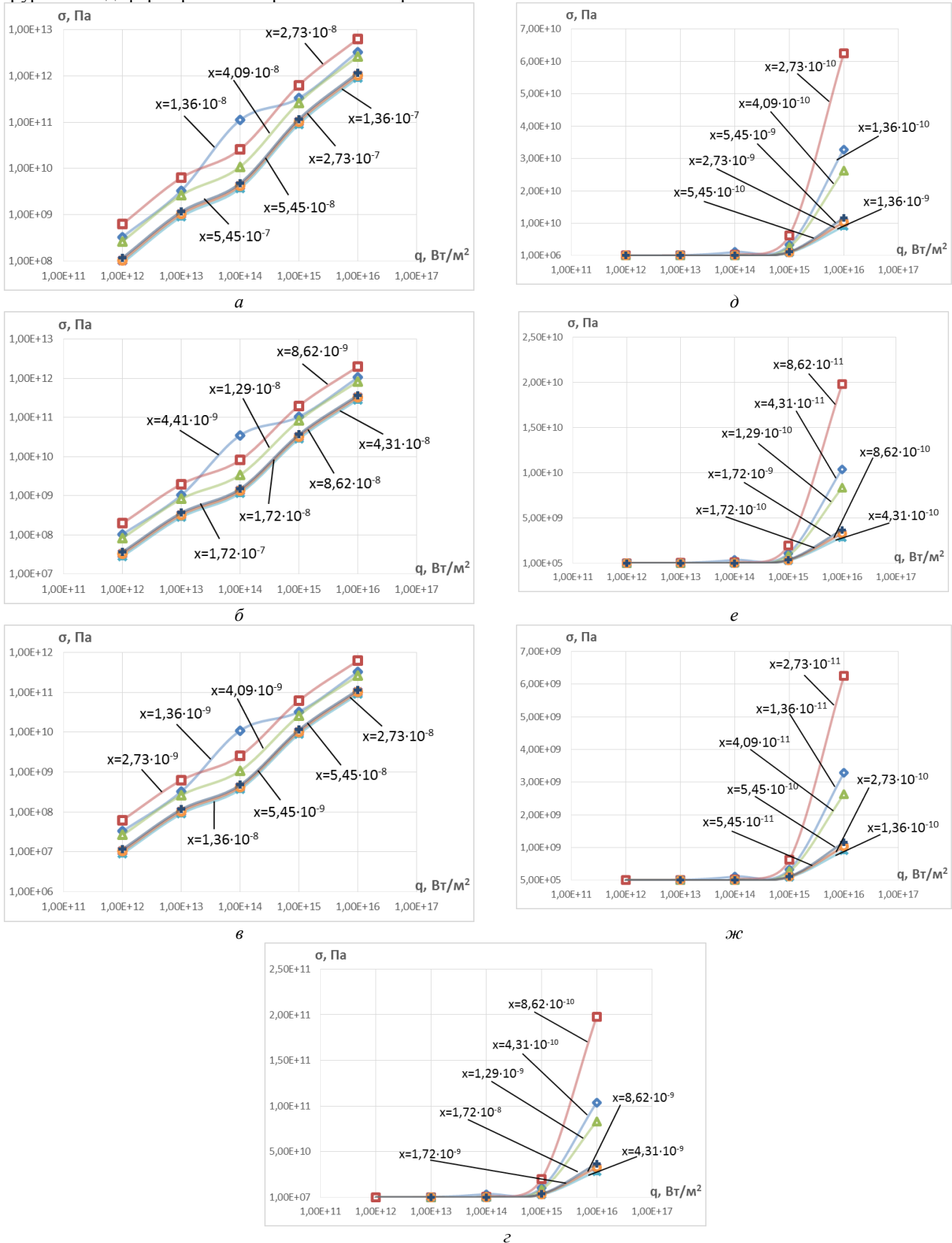


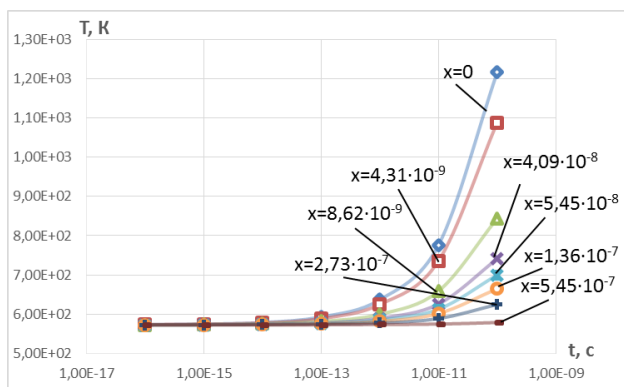
Рис. 6 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на Р6М5К5 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t = 10^{-10}$  с; б –  $t = 10^{-11}$  с; в –  $t = 10^{-12}$  с; г –  $t = 10^{-13}$  с; д –  $t = 10^{-14}$  с; е –  $t = 10^{-15}$  с; ж –  $t = 10^{-16}$  с

Также были рассмотрены зависимости температуры от времени действия лазерного излучения. Эти оценки необходимы для оценки времен действия лазерного излучения при различных плотностях теплового потока ( $10^{12} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>). Зависимости скорости роста температуры от времени действия теплового потока показаны на рис. 7. Видно, что с ростом времени действия теплового потока скорость роста температуры снижается для всех исследованных плотностей теплового потока, несмотря на это она всё равно остаётся больше, чем  $10^7$  К/с.

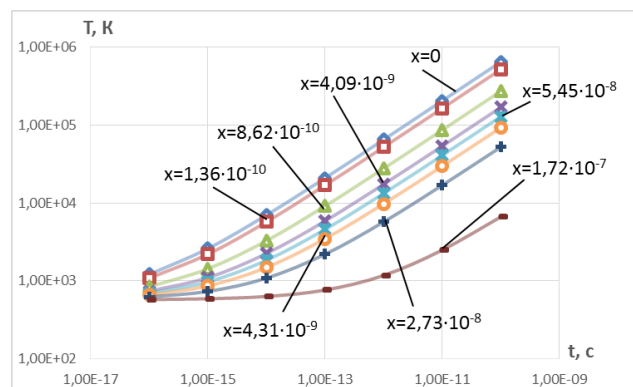
Зависимости скорости роста температуры от времени при действии теплового потока на различных глубинах и при плотностях теплового потока  $10^{14} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> показаны на рис. 8. Видно, что величины скоростей роста превышают  $10^7$  К/с, т. е. при

оценке возможности получения наноструктур этот критерий можно не проверять, так как он получается автоматически в этом диапазоне технологических параметров.

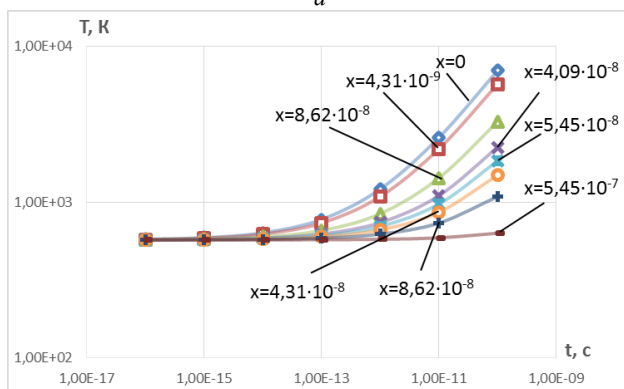
Исследования зависимости температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на Р6М5К5 от времени его действия на разных глубинах при плотностях теплового потока  $10^{12} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> показаны на рис. 9. Видно, что существуют режимы, где температурные напряжения превышают  $10^{10}$  Па. Очевидно, что для этих режимов есть реальная возможность получения наноструктур благодаря деформированию за счёт температурных напряжений. Эти режимы реализуются для плотностей теплового потока  $10^{14} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>.



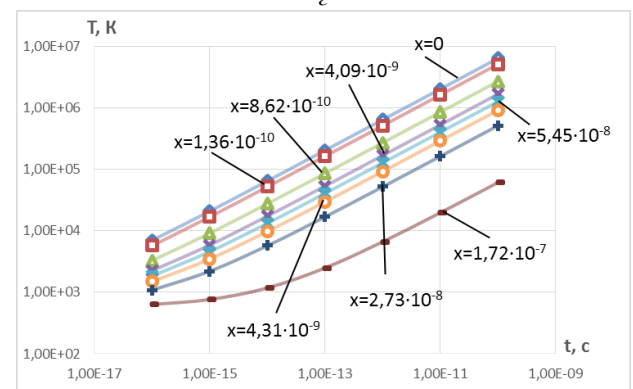
а



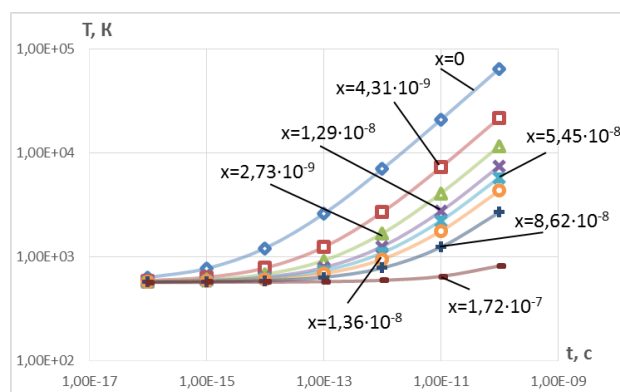
z



б



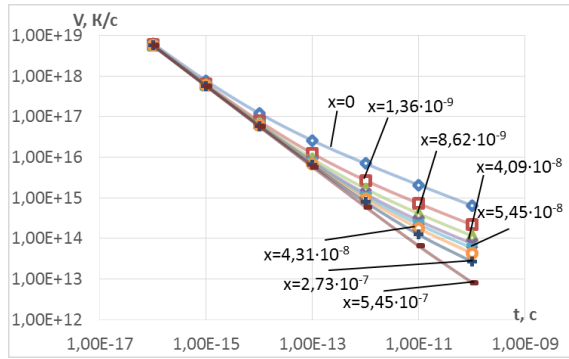
d



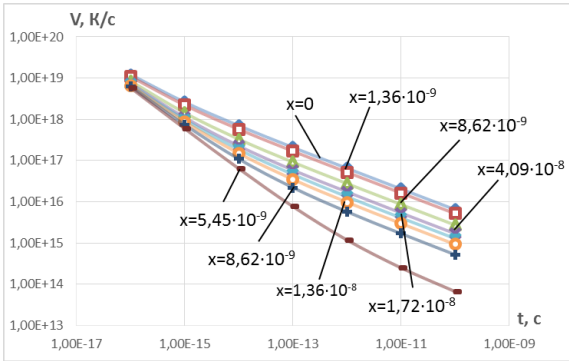
e

Рис. 7 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на Р6М5К5 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока: а –  $q=10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>; б –  $q=10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>; в –  $q=10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>; з –  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>; д –  $q=10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>

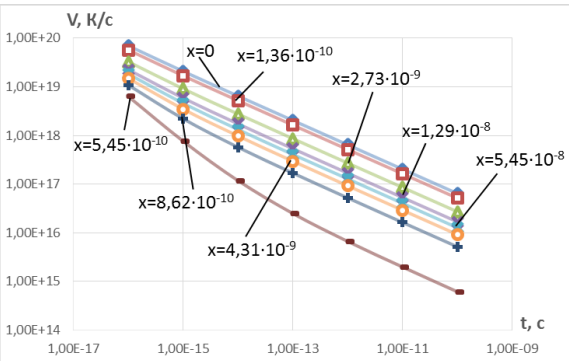




a



b

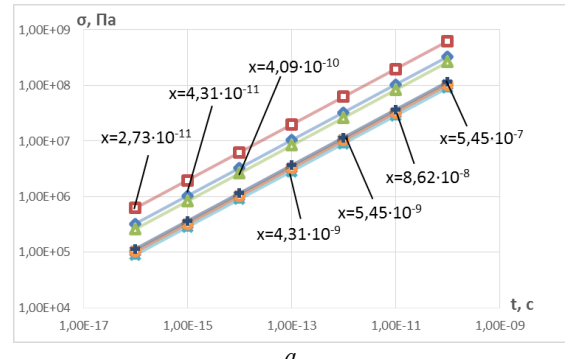


в

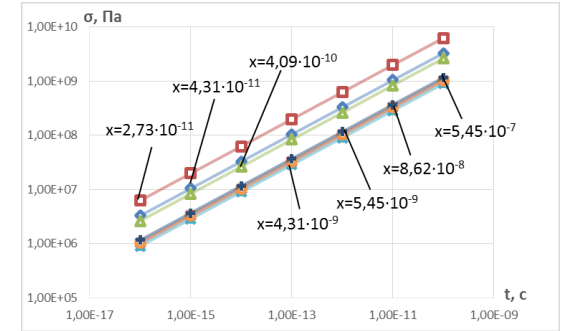
Рис. 8 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на Р6М5К5 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока: а –  $q=10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>; б –  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>; в –  $q=10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>

Важной характеристикой является объём зерна, который определяет, какого рода структуры реализуются (наноструктуры, субмикроструктуры и микро-структуры). Были построены зависимости объёма нанозерна от минимальной и максимальной глубины его залегания (рис. 10). На рисунке видно, при каких плотностях теплового потока есть реальная возможность получения наноструктур (область под пунктирной прямой, соответствующая диаметру зерна 100 нм) при действии ионизирующего излучения с пятном контакта  $10^{-6}$  м. Но эти кривые не позволяют найти время действия теплового потока, хотя плотность его они определяют ( $R_n = 10^{-6}$  м).

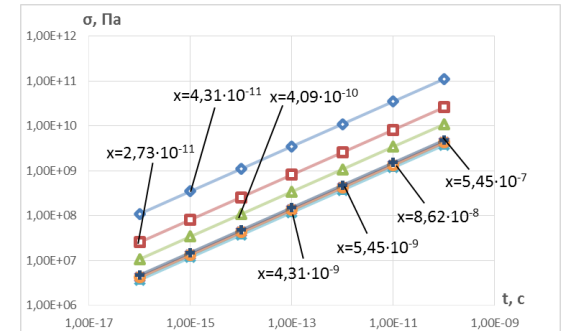
Аналогичные зависимости для случая действия лазерного луча радиусом  $5 \cdot 10^{-7}$  м позволяют для различных режимов оценить возможность получения наноструктур, когда параметры находятся ниже пунктирной линии (рис. 11).



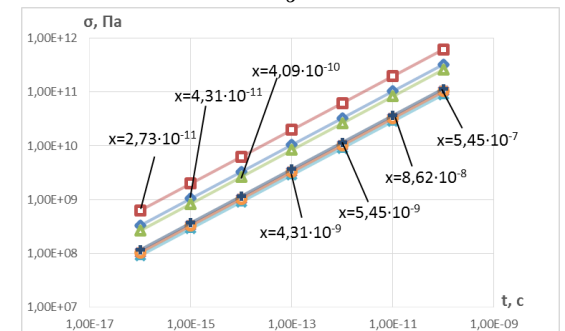
a



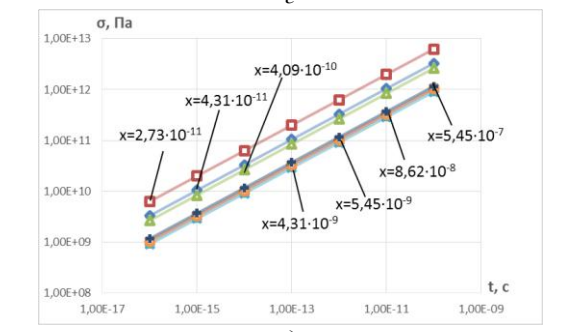
б



в



г



д

Рис. 9 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на Р6М5К5 от времени действия теплового потока на разных глубинах при плотности теплового потока: а –  $q=10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>; б –  $q=10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>; в –  $q=10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>; г –  $q=10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup>; д –  $q=10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>

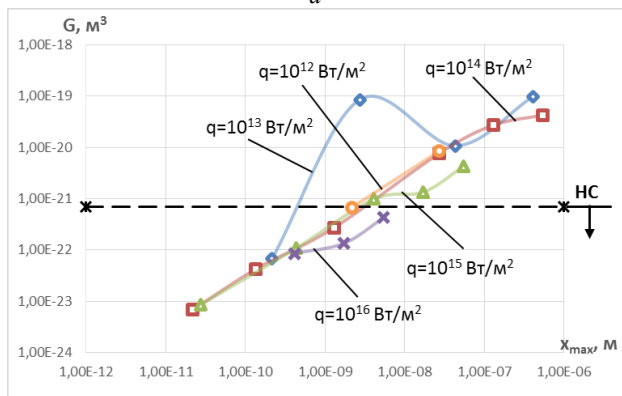
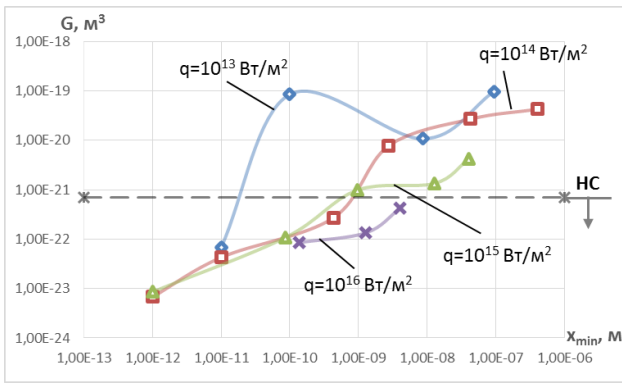


Рис. 10 – Зависимость объёма нанокластера  $R = 10^{-6}$  м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока  $q$  (Р6М5К5)

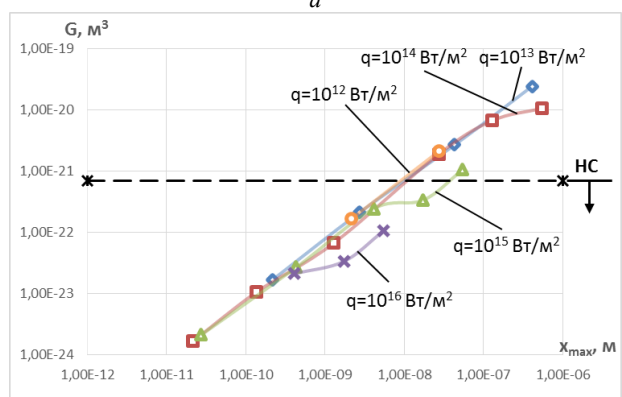
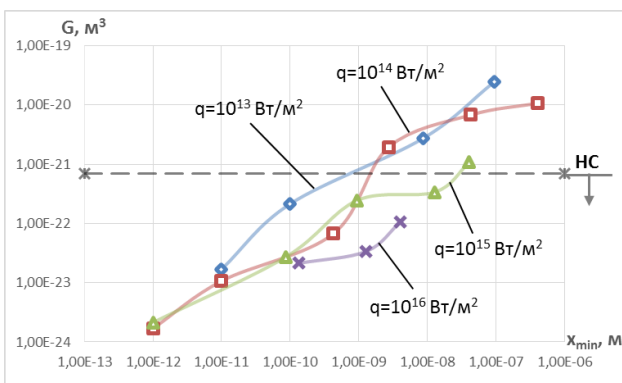


Рис. 11 – Зависимость объёма нанокластера  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м от минимальной (а) и максимальной глубины (б) при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока  $q$  (Р6М5К5)

Для определения круга технологических параметров, при которых получают наноструктуры и оценки их объёма, построены пространственные картины зависимости объёма наноструктуры от плотности теплового потока и времени его действия, представлены на рис. 12, а, для радиуса пятна контакта луча  $10^{-6}$  м с материалом, а для радиуса  $5 \cdot 10^{-7}$  м – рис. 12, б. Видно, что со снижением размера пятна объёмы получаемых зерен уменьшаются, а, следовательно, уменьшаются и его размеры.

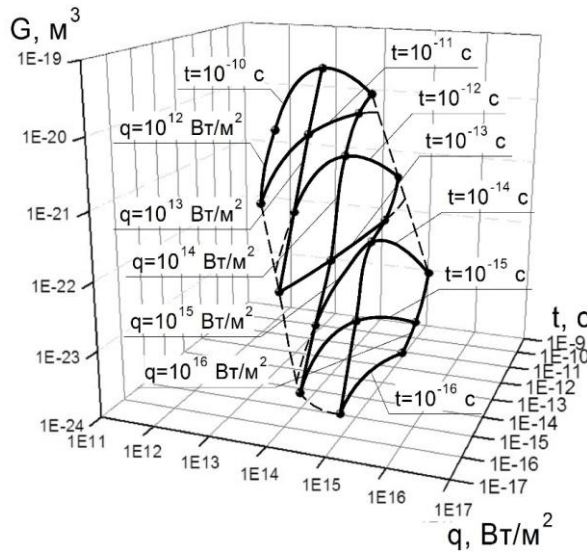
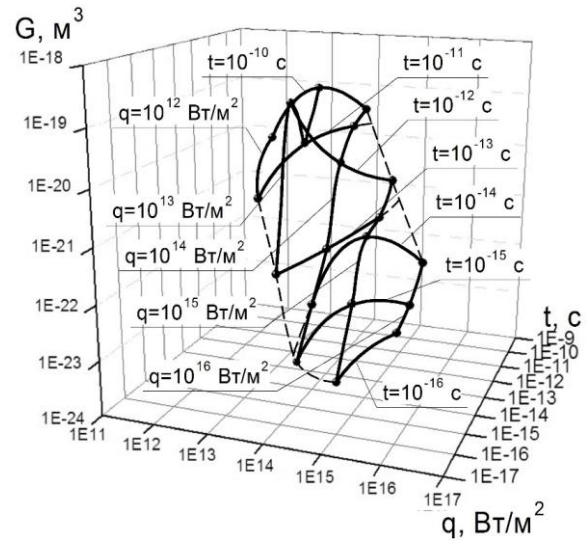


Рис. 12 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры: а –  $R = 10^{-6}$  м, б –  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м

**Выводы.**

1. Построенные зависимости температуры от плотности теплового потока лазерного излучения и времени его действия позволяют оценить области технологических параметров, где есть возможность получения наноструктур.
2. Показано, что скорости роста температур превышают необходимые –  $10^7$  К/с для образования наноструктур.

3. Обнаружена реальная возможность получения наноструктур за счёт деформирования материала вследствие действия температурных напряжений, когда они превышают  $10^{10}$  Па.

4. Полученные размеры зерна в зависимости от плотности теплового потока и минимальной и максимальной глубины его залегания, что позволило найти области, в которых есть реальная возможность получения нанозерна.

5. Пространственные кривые зависимостей объёма зерна от плотности теплового потока и времени его действия позволяют проводить экспресс-оценку технологических параметров лазера для получения наноструктур.

6. Показано, что применение фемто-секундных лазеров позволяет существенно расширить возможности получения наноструктур на быстрорежущих сталях.

#### Список литературы

1. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрытиями и наноструктурными модифицированными слоями: Моногр.-справ.: в 2 кн. / Г. И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. Костюк Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. Костюк Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с.
5. Костюк, Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.
6. Костюк Г. И. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
7. Костюк Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
8. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
9. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.
10. Костюк, Г. И. Физико-технические основы роботизированного производства: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.
11. Гречихин Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
12. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
13. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства / А. И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.
14. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
15. Решетняк, Е. Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий / Е. Н. Решетняк, А. И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.
16. Андреевский П. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / П. А. Андреевский // Физика металлов и металлоредение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.
17. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала / А. А. Гончаров, П. И. Игнатенко, В. В. Петухов и др. // ЖТФ. –2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

#### Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur: monogr* [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologii, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologii, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. 596 p.
5. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Reference for calculation of the main physical and technological parameters, assessing opportunities, selecting the type of technologies and equipment]. 482 p.
6. Kostyuk, G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
7. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh tekhnologiy: ucheb.posobiye* [The scientific basis for the creation of modern technologies] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2008. 552 p.
8. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
9. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiyem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, AINU, 2003. 412 p.
10. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva* [Physical and technical bases of robotized production] – Kharkov, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2006. – 614 p.
11. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologii* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
12. Aksenov, I. I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy* [Vacuum arc erosion plasma sources] – Kharkiv, NII «KHFTI», 2005. 211 p.
13. Gusev, A. I. *Nanokristallicheskiye materialy: metody polucheniya i svoystva* [Nanocrystalline materials: methods and properties] – Ekaterinburg, Publishing House of the Russian Academy of Sciences, Ural Division, 1998. 302 p.
14. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
15. Reshetnyak, E. N., Strel'nitskiy A. I. [Synthesis of hardening of nanostructured coatings] – [Problems of Atomic Science and Technology]. – 2008. – № 2. – p.p. 119 – 130.

16. Andriyevskiy, R. A. *Nanomaterialy: kontsepsiya i sovremennyye problemy* [Nanomaterials: concept and modern problems] Fizika metallov i metallovedeniye. 2003. – Т. 91, № 1. – p.p. 50 – 56.
17. Goncharov A. A., Ignatenko P. I., Petukhov V. V. et al. *Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tantala* [The

composition, structure and properties of nanostructured films of tantalum borides]. ZhTF. – 2006. – Т. 76, no. 10. – p.p. 82 – 87.

Поступила (received) 15.11.16

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Підвищення ефективності різальних інструментів зі швидкорізальної сталі Р6М5К5 за рахунок обробки променем лазера, працює в фемтосекундного випромінювання / Г. І. Костюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 54–68. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Повышение эффективности режущих инструментов из быстрорежущей стали Р6М5К5 за счет обработки лучем лазера, работающего в фемтосекундном диапазоне / Г. И. Костюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 54–68. – Библиогр.: 17 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Improving the efficiency of cutting tools HSS W6Mo5Co5 by treating ray lasers in the femtosecond range / G. I. Kostyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.54–68. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-004X.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Костюк Геннадий Игоревич** – доктор технических наук, профессор Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», м. Харьков; тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Kostyuk Gennadiy Igorevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovskiy, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru.

УДК 621.77

Л. В. АВТОНОМОВА, Е. Д. ГРОЗЕНОК, А. В. СТЕПУК

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОКОВКИ ПОДШИПНИКОВОГО КОЛЬЦА ПРИ ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКЕ**

Проведено математическое моделирование технологического процесса горячей штамповки подшипникового кольца. Численно решена нестационарная контактная термовязкопластическая задача с соответствующими граничными условиями на базе метода конечных элементов. Начальное распределение поля температур было получено при решении задачи индукционного нагрева цилиндрической заготовки. Расчет параметров напряженно-деформированного состояния заготовки, возникающих в процессе технологической операции осадки и формовки, позволил сформировать картины распределения волокнистой структуры материала. Была предложена альтернативная операция двухпроходной формовки, которая позволила получить картину более рационального распределения волокнистой структуры поковки кольца подшипника. Для двухпроходной формовки найдены геометрические размеры пуансона предварительной формовки, при проходе которого после завершения технологической операции окончательной формовки была получена волокнистая структура поковки кольца подшипника с минимальными значениями углов выхода волокон на контактную поверхность (дорожку качения). Это позволяет предположить, что в дальнейшем после оптимального технологического процесса раскатки можно изготовить подшипниковые кольца повышенной долговечности.

**Ключові слова:** подшипниковые кольца, волокнистая структура, формовка, осадка, штамповка, метод конечных элементов.

Проведено математичне моделювання технологічного процесу гарячого штампування підшипникового кільця. Чисельно вирішена нестационарна контактна термовязкопластична задача з відповідними граничними умовами на базі методу скінчених елементів. Початковий розподіл поля температур було отримано при рішенні задачі індукційного нагріву заготовки. Розрахунок параметрів напружено-деформованого стану заготовки, які виникають в процесі технологічної операції осадки і формування, дозволив сформувати картини розподілу волокнистої структури матеріалу. Була запропонована альтернативна операція двопрхідного формування, яка дозволила отримати картину раціональнішого розподілу волокнистої структури поковки кільця підшипника. Для двопрхідного формування знайдені геометричні розміри пуансона попереднього формування, при проході якого після завершення технологічної операції остаточного формування була отримана волокниста структура поковки кільця підшипника з мінімальними значеннями кутів виходу волокон на контактну поверхню (доріжку качення). Це дозволяє припустити, що в подальшому після оптимального технологічного процесу розкочування можна виготовити підшипникове кільця підвищеної довговічності.

**Ключевые слова:** підшипникові кільця, волокниста структура, формування, осадка, штампування, метод кінцевих елементів.

Mathematical modeling of the hot stamp process for a bearing ring performed. The unsteady contact thermo-viscous-plastic problem with the appropriate boundary conditions solved applying the finite element method. The solution of the inductive heating for a work piece provided the initial temperature field distribution. Calculation of the work piece stress-strain state parameters during technological process operations of precipitation and molding allowed generating a picture of the material's fiber structure distribution. The more rational fibrous structure distribution within the bearing rings suggested with an alternative two-pass molding operation. The punch geometrical sizes of the preform defined for two-pass forming. It passes in process after forming to obtain the final fiber structure of bearing ring forgings with minimum values of output fibers angles to the contact surface (raceway). This suggests an opportunity to produce the in-cresed-term durable bearing rings applying the optimum rolling preprocess further o.

**Keywords:** bearing ring, fibrous structure, forming, sludge, forming, finite element method.

**Введение.** Для современного машиностроения актуальной задачей является повышение надежности и срока службы высоконагруженных деталей машин, подверженных контактному воздействию, например, подшипников. В процессе эксплуатации подшипникового узла основной причиной выхода его из строя является выкрашивание дорожки качения подшипникового кольца. Поэтому необходимо проводить модернизацию технологического процесса изготовления колец, которая позволит увеличить их ресурс за счет повышения сопротивления контактной усталости. Рациональный подбор технологических параметров соответствующего техпроцесса на стадии проектирования обеспечит гарантированное качество и максимальную долговечность подшипников.

**Анализ последних исследований и литературы.**

Технологический процесс производства подшипниковых колец включают в себя: нагрев цилиндрической заготовки, горячую штамповку и раскатку кольца.

Современные исследования, посвященные технологии изготовления подшипниковых колец с повышенной эксплуатационной стойкостью, освещены во многих литературных источниках. Вопросы подбора оптимальных параметров процесса нагрева заго-

товки, с точки зрения энергоэффективности и быстродействия, рассмотрены в работах [1,2]. Многочисленные исследования показали, что основным определяющим фактором для повышения долговечности при штамповке является учет волокнистой структуры материала [3,4]. Волокнистое строение должно удовлетворять требованиям симметричности, соответствовать контуру детали и не выходить на контактную поверхность (дорожку качения) для подшипника. Экспериментальные исследования волокнистой структуры готовых колец подшипников позволили установить связь параметров технологического процесса изготовления и его качества [5]. В частности, с этой целью проводится математическое моделирование отдельных этапов технологического процесса изготовления подшипникового кольца с использованием аналитических и численных методов [6,7].

**Целью** данной статьи является определение рациональных параметров технологического процесса формовки, которые позволяют улучшить распределение волокнистой структуры поковки подшипникового кольца.

**Постановка задачи и численная реализация.**

Процесс горячей штамповки подшипникового кольца включает в себя следующие этапы: осадка, формовка и прошивка. На первом этапе - осадке в

© Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенок, А. В. Степук, 2016

нагретой цилиндрической заготовке происходит перераспределение волокнистой структуры, которая возникает при изготовлении заготовки в процессековки и представляет собой вытянутые в направлении деформирования (оси заготовки) сгруппированные дробленые кристаллы и неметаллические включения, примеси на границах зерен. Вследствие этого, материал заготовки получает структурную анизотропию, приводящую к зависимости только величины ударной вязкости образца от ориентации волокон [8,9]. Далее на этапе формовки происходит дальнейшее изменение распределения волокнистой структуры в поковке подшипникового кольца. Т.к. распределение волокнистой структуры заготовки для подшипникового кольца связано с ее деформированием, то за изменением этого распределения можно наблюдать с помощью линий Лагранжа при решении задачи определения параметров напряженно-деформированного состояния при соответствующей технологической операции.

При математическом моделировании всех этапов технологического процесса горячей штамповки необходимо решать нестационарную контактную термовязкопластическую задачу с соответствующими начальными и граничными условиями. Полная система разрешающих уравнений включает в себя: уравнения равновесия, неразрывности, условие пластичности и физические нелинейные определяющие соотношения, связывающие между собой параметры напряженного состояния (напряжения, деформации, скорости деформаций и температуру) [6].

Начальное поле распределения температур получено путем решения осесимметричной нестационарной краевой задачи теплопроводности для цилиндрической заготовки при индукционном нагреве [7]. На всех контактных поверхностях (между пуансоном и заготовкой, матрицей и заготовкой) при осадке и формовке задается условия теплового контакта и трение, изменяющееся по закону Зибеля. Внешняя поверхность матрицы жестко закреплена. Режим нагружения задается движением Пуансона с заданной скоростью (кинематическое нагружение). Т.к. процесс горячей штамповки происходит при температурах свыше  $1000^{\circ}\text{C}$ , то при решении краевой контактной термовязкопластической задачи учитывается зависимость от температуры всех механических характеристик материала и параметров напряженно-деформированного состояния.

В работе представлено численное моделирование процесса горячей штамповки методом конечных элементов. С этой целью численно решалась нестационарная термовязкопластическая задача контактного взаимодействия пуансона с предварительно нагретой цилиндрической заготовкой при операциях осадки и формовки. Конечно-элементная модель включает 11024 узла и 10573 элементов. Коэффициент трения с учетом смазки на контактных поверхностях между пуансоном и поковкой выбирается равным  $\mu=0,3$ . Скорость движения пуансона  $V_n = 100$  мм/с. Материал заготовки Сталь ШХ15. Цилиндрическая заготовка ( $R_3=50$ мм,  $h_3=190$ мм) предварительно неравномерно нагрета. Температура по всему объему изменяется от  $T_0 = 1110^{\circ}\text{C}$  до  $T_0 = 1140^{\circ}\text{C}$ .

На первом шаге решения задачи определяется напряженно-деформированное состояние заготовки после технологической операции осадки. На рисунке 1 представлено распределение линий Лагранжа, соответствующее укладке волокон в материале после осадки. Макроструктура заготовки претерпевает изменение за счет перемещения частиц (течения) материала. В результате этого явления волокна первичной макроструктуры заготовки переходят в волокна вторичной макроструктуры с определенной ориентацией к рабочим поверхностям получаемой поковки. Угол выхода волокон  $\varphi_i$ , который измеряется между касательной к линии Лагранжа (волокна) и образующей внутренней поверхности поковки в месте выхода линии Лагранжа на рабочую поверхность поковки, является характеристикой качества структурной волокнистости.



Рис. 1- Распределение волокон после процесса осадки цилиндрической заготовки

На рисунке 2(а) представлено распределение линий Лагранжа (волокон) в поковке после однократной формовки пуансоном радиуса  $R = 48$ мм. Наблюдается выход части линий (волокон) на внутреннюю поверхность поковки (дорожку качения) под углом  $\varphi_i$  от  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ . Так линия Лагранжа №3 выходит под углом  $90^{\circ}$  и линий с №3 по №7 (серединные волокна) выходят на дорожку качения, при этом не соблюдается параллельность линий (расположение волокон под углом) образующим внешней и внутренней поверхности поковки (см. рисунок 2(б)). Данная макроструктура позволяет сделать вывод об ожидаемой сравнительно невысокой контактной выносливости [8] подшипникового кольца, т.к. экспериментально установлено, что при работе подшипникового кольца в условиях эксплуатации детали волокна должны быть параллельны траекториям главных касательных напряжений и перпендикулярны нормальным контактным

давлениям (направлению распространения трещин) [9].

Для повышения долговечности подшипникового кольца предлагается использовать процесс двухпроходной формовки: после процесса осадки цилиндрической заготовки при формовке осуществляется проходка пуансоном меньшего диаметра, затем, после поворота первоначальной поковки на  $180^\circ$  град, повторно проходят пуансоном с диаметром, соответствующим поковке кольца.

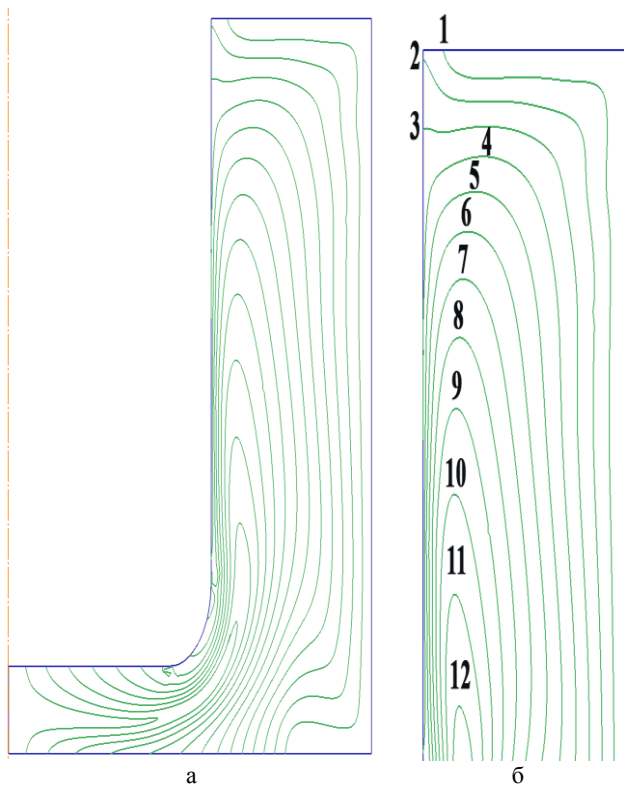


Рис. 2 - Распределение волокон после однопроходной формовки

На рисунке 3 приведена схема проведения двухпроходной формовки: а – для пуансона меньшего диаметра  $d=76$ мм, б – для пуансона диаметра, соответствующего диаметру поковки подшипникового кольца  $D=96$ мм. Для двухпроходной формовки конечное распределение линий Лагранжа представлено на рисунке 4. Следует отметить, что на торцевую поверхность поковки выходят с линии №1 по линии №6. На контактную поверхность выходят линия №7 и линия № 8, причем величины углов  $\varphi_7$  и  $\varphi_8$  достаточно малы, а выход линий с углом  $\varphi_1 = 90^\circ$  отсутствует.

В работе было проведено исследование влияния величины диаметра пуансона  $d$  для первичной проходки в процессе двухпроходной формовки на конечное распределение линий Лагранжа в готовой поковке подшипникового кольца. Для этого численно были решены задачи определения параметров напряженно-деформированного состояния и получены картины распределения линий Лагранжа в поковке подшипникового кольца при предварительном проходе пуансоном с диаметром  $d = 66$ мм и  $d = 86$ мм

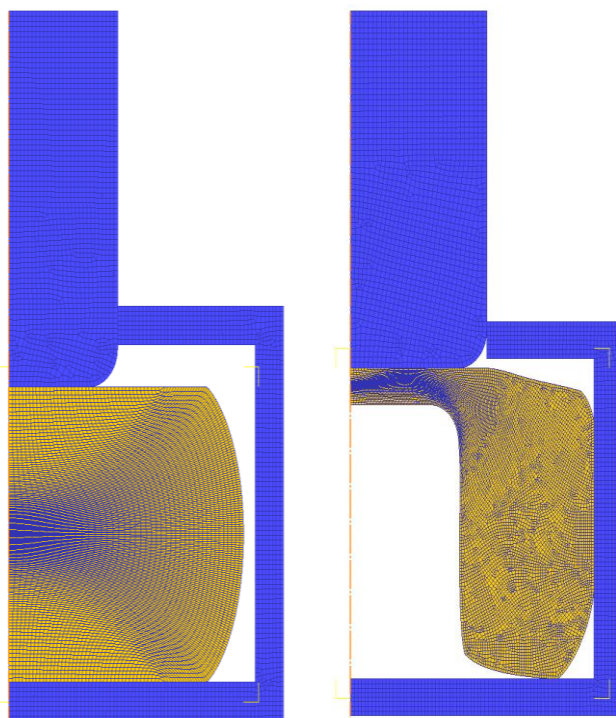


Рис. 3 - Схема операции двухпроходной формовки

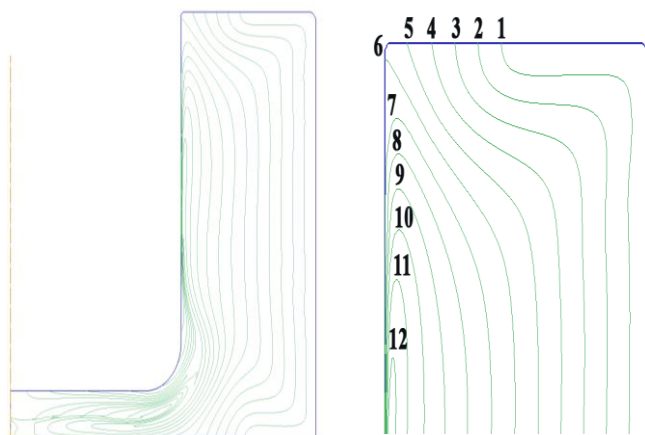


Рис. 4 - Распределение волокон поковки после двухпроходной формовки ( $d=76$ мм)

На рисунке 5 представлены поковки подшипникового кольца двухпроходной формовки для двух значений диаметра пуансона: а)  $d = 66$ мм, б)  $d = 86$ мм.

При сравнении рисунка 4 и рисунка 5 можно видеть, что картина распределения линий Лагранжа, имеющая наименьшее количество линий Лагранжа, выходящих на контактную поверхность с минимальным углом  $\varphi_1$ , представлена на рисунке 4. Это позволяет предположить, что более рациональная волокнистая структура поковки подшипникового кольца может быть получена при предварительном проходе пуансоном диаметром  $d=76$ мм в процессе двухпроходной формовки. Данная поковка в дальнейшем при оптимальном технологическом процессе раскатки позволит получить подшипниковое кольцо с повышенной долговечностью.

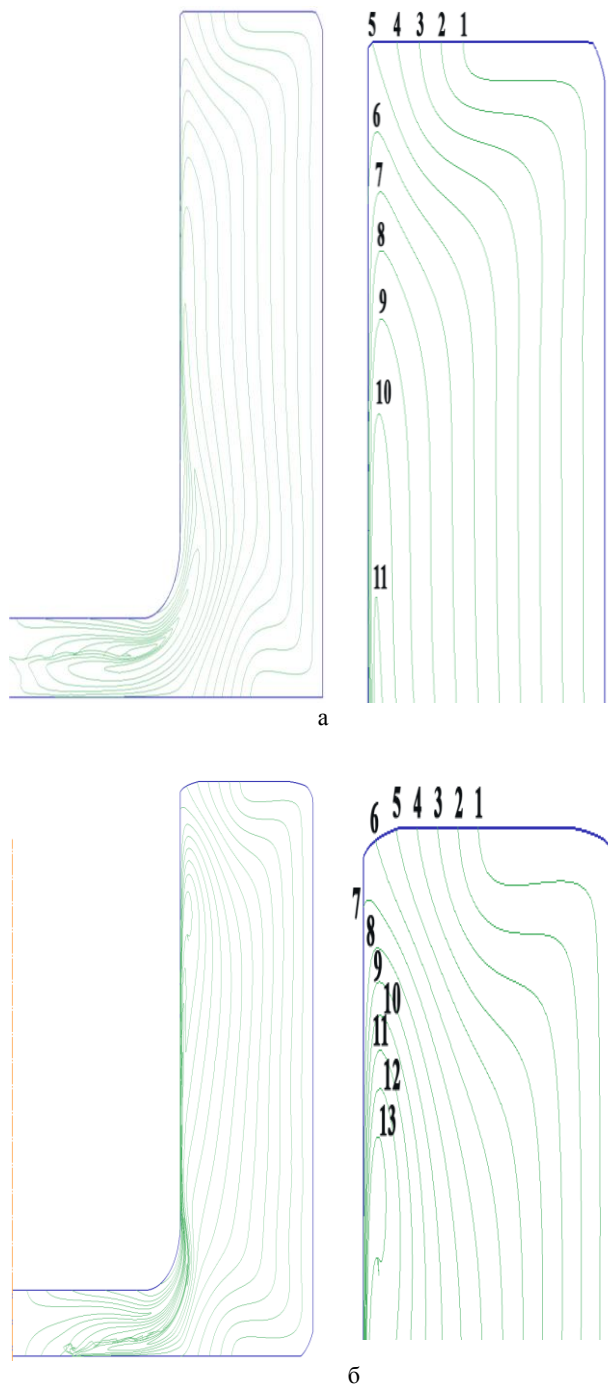


Рис. 5 - Распределение волокон поковки при двухпроходной формовке для  $d=66\text{мм}$  и  $d=86\text{мм}$

### Выводы.

В работе проведено численное моделирование технологического процесса горячей штамповки подшипникового кольца. С этой целью методом конечного элемента численно была решена нестационарная контактная термовязкопластическая задача для этапов осадки и формовки. Определение параметров напряженно-деформированного состояния позволило получить картины распределения волокнистой структуры поковки кольца подшипника в виде линий Лагранжа для процесса одно- и двухпроходной формовки. Установлено влияние размера диаметра пуансона для предварительной проходки на окончательное распре-

деление и выход волокон на внутреннюю поверхность (дорожку качения) поковки подшипникового кольца. Получена картина рационального распределения волокнистой структуры поковки кольца подшипника с минимальным значением величины углов выхода волокон на дорожку качения, что повышает сопротивление данной поверхности контактной усталости и увеличивает долговечность подшипника.

### Список литературы

1. Данилушкин А. И. Математическая модель индукционного нагрева цилиндрических заготовок перед раскаткой / А. И. Данилушкин, С. В. Князев, С. И. Семенов // Вестник ВГТУ. 2012. №10-1 С. 101-103.
2. Плевшвецва Ю. Э. Оптимальное по быстродействию и энергопотреблению управление периодическим процессом индукционного нагрева металла / Ю. Э. Плевшвецва, А. В. Попов, А. И. Дьяконов. // Альманах современной науки и образования. 2013. №2 (69) С.135-142.
3. Банньих О. А. Штамповка поковок с направленным волокнистым строением / О. А. Банньих, О. А. Белокуров // Вестник машиностроения. – 2000 – №10. – С. 33-37.
4. Колотенков И. В. К вопросу о влиянии макроструктуры металла на долговечность подшипников качения / И. В. Колотенков // Труды ВНИИПП. –1962. – Вып. 3. – С. 3-16.
5. Шейн А. С. Влияние ориентировки волокон на контактную усталостную прочность закаленной стали / А. С. Шейн // Митом. 1957. – № 12. – С. 61-66.
6. Унксов Е. П. Теорияковки и штамповки / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров [и др]. – М. : Машиностроение, 1992. – 720с.
7. Грозенок Е. Д. Численное моделирование температурного поля заготовок при индукционном нагреве для изготовления подшипниковых колец / Е. Д. Грозенок, Э. А. Симсон, А. В. Степук, С. Ю. Шергин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х. : НТУ «ХПІ», – 2016. – № 26 (1198). – С. 50-53.
8. Раузин Я. Р. Влияние макроструктуры металла на контактную выносливость и долговечность подшипников качения / Я. Р. Раузин // Контактная прочность машиностроительных материалов: Сб. научных трудов. – М. : Наука, – 1964. – С. 51-55.
9. Hertzberg R. W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. New York, John Wiley & Sons, 1983. 697 p.

### References (transliterated)

1. Danilushkin A. I., Knyazev S. V., Semenov S. I. Matematicheskaya model induktsionnogo nagreva tsilindricheskikh zagotovok pered raskatkoy. *Vestnik VGTU*, 2012, no10-1, pp. 101-103.
2. Pleshivtseva Yu. E., Popov A. V., Dyakonov A. I. Optimalnoe po bystrodeystviyu i energopotrebleniyu upravlenie periodicheskim protsessom induktsionnogo nagreva metalla. *Almanah sovremennoy nauki i obrazovaniya*, 2013, No 2 (69), pp.135-142.
3. Banniyh O. A., Belokurov O. A. Shtampovka pokovok s napravlyennym voloknistym stroeniem. *Vestnik mashinostroeniya*, 2000, No 10. 33 p.
4. Kolotenko I. V. K voprosu o vliyaniy makrostrukturny metalla na dolgovechnost podshipnikov kacheniya. *Moskv, Trudy VNIIPP*, 1962, No 3. 3 p.
5. Sheyn A. S. Vliyanie orientirovki volokna na kontaktnuyu ustalostnuyu prochnost zakalennoy stali. *Moskva, Trudy VNIIPP*, 1957, no 12. 61 p.
6. Unksov E. P., Dzhonson U., Kolmogorov V. L. i dr. *Teoriya kovki i shampovki*. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 720 p.
7. Grozenok E. D., Simson E. A., Stepuk A. V., Shergin S. Yu. Chislennoe modelirovanie temperaturnogo polya zagotovok pri induktsionnom nagreve dlya izgotovleniya podshipnikoviyh kolets. *Visnik NTU «HPI». Seriya: Dinamika i mitsnist mashin*. Kharkov, NTU «HPI», 2016, No 26 (1198), pp. 50-53.
8. Rauzin Ya. R. Vliyanie makrostrukturny na kontaktnuyu vyinoslivost i dolgovechnost podshipnikov kacheniya. *Kontaktная прочность машиностроительных материалов: Sb. nauchnykh trudov*. Moscow: Nauka, 1964.
9. Hertzberg R. W. *Deformation and fracture mechanics of engineering materials*. New York: John Wiley & Sons, 1983. 697 p.

Поступила (received) 17.10.15



*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Дослідження розподілу волокнистої структури підшипникового кільця при гарячому штампуванні / Л. В. Автономова, Є. Д. Грозенюк, А. В. Степук** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 69–73. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

**Исследование распределения волокнистой структуры поковки подшипникового кольца при горячей штамповке / Л. В. Автономова, Е. Д. Грозенюк, А. В. Степук** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 69–73. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

**Distribution of the fibrous structure in bearing rings during hot stamping / L. V. Avtonomova, I. D. Grozenok, A. V. Stepuk** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.69–73. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Автономова Людмила Володимирівна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», провідний науковий співробітник кафедри «Опір матеріалів», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

**Автономова Людмила Владимировна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ведущий научный сотрудник кафедры «Сопrotивление материалов», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

**Avtonomova Ludmila** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Leading Researcher at the Department of "Strength of Materials", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: lavtonomova@gmail.com

**Грозенюк Євген Денисович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Опір матеріалів», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

**Грозенюк Евгений Дмитриевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры «Сопrotивление материалов», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

**Grozenok Ievgen** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student at the Department of "Strength of Materials", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: ev.grozenok@gmail.com

**Степук Александр Владимирович** – кандидат физ.-мат. наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший научный сотрудник кафедры «Сопrotивление материалов», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: alexstepuk@gmail.com

**Степук Александр Владимирович** – кандидат физ.-мат. наук, Национальный технический университет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Сопrotивление материалов», тел.: (057) 707-61-78, e-mail: alexstepuk@gmail.com

**Stepuk Oleksandr** – Candidate of Physical- Mathematical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Researcher, Department of "Strength of Materials", tel.: (057) 707-61-78, e-mail: alexstepuk@gmail.com

УДК 621.9

А.А. ПЕРМЯКОВ, О.Ю. ПРИХОДЬКО, С.Е. СЛИПЧЕНКО

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЦИКЛОМ АГРЕГАТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ

Використання базових моделей кінцевих автоматів, а саме автоматів Милі і Мура, що називаються автоматами I і II роду, і їх використання при здійсненні управління складними технологічними системами. Дана автоматична лінія включає три одиниці технологічного устаткування і обслуговується конвеєрною системою і роботами-маніпуляторами. Обґрунтований перехід від моделі Милі до моделі Мура може бути використаний у разі, коли принципове значення має спостереження за складною агрегатованою технологічною системою в конкретний момент або заданий проміжок часу, наприклад, в налагоджувальному режимі при пуску конкретної автоматичної лінії.

**Ключові слова:** кінцеві автомати, моделювання, алгоритм, Теорема Кліні, машини Тьюрінга, абстрактний синтез програмованих логічних контролерів, автомат Милі, автомат Мура.

Использование базовых моделей конечных автоматов, а именно автоматов Мили и Мура, называемых автоматами I и II рода, и их использования при осуществлении управления сложными технологическими системами. Рассматриваемая автоматическая линия включает в себя три единицы технологического оборудования и обслуживается конвейерной системой и роботами-манипуляторами. Обоснованный переход от модели Мили к модели Мура может быть использован в случае, когда принципиальное значение имеет наблюдение за сложной агрегированной технологической системой в конкретный момент или заданный промежуток времени, например, в налагодочном режиме при пуске конкретной автоматической линии.

**Ключевые слова:** конечные автоматы, моделирование, алгоритм, Теорема Клини, машины Тьюринга, абстрактный синтез программируемых логических контроллеров, автомат Мили, автомат Мура.

Use of base models of eventual automats, namely automats of the Mile and Mura, named the automats of I and II of family, and their use, during realization of management by the difficult technological systems. The examined automatic transfer line plugs in itself three pieces of technological equipment and served by the pipeline system and robots-manipulators.

A reasonable transition from the model of Mile to the model of Mura can be used in the case when a fundamental value has watching the difficult packaged technological system in concrete moment or set interval of time, for example, in the adjusting mode at starting of concrete automatic transfer line.

**Keywords:** eventual automats, design, algorithm, Theorems of Kleene, machine of Turing, an abstract synthesis is logical piops, automat of Mile, automat of Mura.

**Введение.** В современном мире существует множество сфер, в которых необходим автоматический контроль и управление процессами. Современные технологии в свою очередь открывают возможность расчета сложных алгоритмов управления, чем в разы увеличивает скорость, а также упрощая весь процесс автоматизации. Конечные автоматы, которые в течение многих десятилетий использовались в основном при аппаратных реализациях цифровой электроники, в настоящее время все шире применяются в самых различных областях и при решении многих злободневных задач. Мощное и вполне оправданное применение получили конечные автоматы в теории формальных грамматик, математической лингвистике, теории логических моделей, математической логике и формальных аксиоматических систем, теории кодирования и других.

### Анализ последних исследований и литературы.

В данной статье будут рассмотрены конечные автоматы. При сравнении конечных автоматов с другими методами моделирования возникает вопрос: что может «делать» конечный автомат? Ответ дается в различных терминах в зависимости от того, является ли автомат автономным или нет [1]. Автономный конечный автомат, начиная с некоторого такта, может лишь генерировать периодическую последовательность состояний  $x$ . В связи с тем, что последовательное выполнение заданного цикла операций типично для многих областей современной техники, динамические системы, которые в приемлемой идеализации можно рассматривать как автономный автомат, имеют широкое применение.

Современным примером служат многие станки-автоматы, автоматические линии и системы автоматического управления циклическими производствами. Если автомат не автономен, то есть состояние входа изменяется от такта к такту, то ответ на вопрос: какие события могут и какие не могут быть представлены в конечном автомате каждым из возможных состояний (или каждым из выходных символов). Ответ дается теоремами Клини [2]. Этот ответ точный, так как теоремы Клини устанавливают необходимые и достаточные условия представимости последовательности событий в автомате, а именно: выделяются особые множества последовательностей входных символов — регулярные множества. Факт появления входной последовательности из такого множества называется соответствующим регулярным событием. Теоремы Клини устанавливают, что в конечном автомате могут быть представлены регулярные события и только они. Таким образом, на языке представления событий ответ на вопрос, что может «делать» конечный автомат, дается однозначно: конечный автомат может представлять только регулярные события.

Если расширить класс динамических систем, которые мы определили термином «конечный автомат», включением бесконечной памяти, то для динамических систем этого более широкого класса (абстрактные системы этого класса называют машинами Тьюринга [3]) понятно, что они могут реализовать любой наперед заданный алгоритм. При этом само понятие алгоритма трактуется в современной математике как реализация вычисления значений какой-либо рекурсивной функции.

© А.А. Пермяков, О.Ю. Приходько, С.Е. Слипченко, 2016

Одним из примеров таких алгоритмов является применение конечных автоматов в прогнозировании, где они используются в рамках эволюционного метода моделирования [4]. Эволюционный метод представляет собой машинный универсальный способ построения прогнозов. Путем указания неких макросостояний системы, выбранных до проведения экспериментов на основе данных, которые задают лишь предысторию выбранных состояний. Метод использует признаки теории Дарвина для построения интеллектуальных систем и основан на принципах мутации и естественного отбора, по определенным критериям.

Принцип прогнозирования состоит в том, что детерминированные автоматы Милли [5], подвергаются случайным изменениям, и сравниваются по критерию оптимальности, в качестве которого задана минимальная ошибка прогнозирования. Автоматы с лучшими характеристиками отбирают для дальнейшего «совершенствования».

**Целью** данной статьи является рассмотрение вопросов использования автоматов Мили и Мура, называемых автоматами I и II рода, в вопросах их использования при осуществлении управления сложными технологическими системами, каковыми и являются производственные автоматические линии.

**Постановка проблемы.** При проектировании на этапе анализа на основе технического задания выделяются сущности, каждая из которых называется автоматом (например, обрабатывающий центр или силовой агрегат). Состояния каждого автомата первоначально определяются по выделенным состояниям объекта управления или его части, а при большом их количестве – по алгоритму управления, построенному в другой нотации (например, в виде схемы алгоритма). В автоматы также могут быть введены и другие состояния, связанные, например, с неправильными действиями оператора, каждый автомат при необходимости может быть декомпозирован. Итеративный процесс анализа может выполняться многократно и завершается созданием перечня автоматов и перечня состояний для каждого автомата.

На следующем этапе строится схема взаимодействия автоматов, отражающая все типы взаимодействий. Она формализует систему взаимодействующих автоматов. Пример схемы связей автомата для модели управления автоматической линией приведен на рис.1.

Связи каждого автомата с его «окружением» формализуются схемой связей автомата, предназначенной для полного описания интерфейса автомата. В этой схеме приводятся источники и приемники информации, полные названия всех воздействий и их обозначения, а также информация о том, в какой автомат он вложен и какие автоматы вложены в него.

Основные обозначения на схеме: QF – входные автоматические выключатели; АЛ-автоматическая линия; НЗ-накопитель заготовок; НД- накопитель деталей; НП- накопитель промежуточный; РМ- робот-манипулятор; КС- конвейерная система; ТС – технологическая система (металлорежущий станок); имя автомата начинается с символа А, имя события - с символа е (от английского слова event — событие), имя входной переменной — с символа х, имя пере-

менной состояния автомата — с символа s, а имя выходного воздействия — с символа у. После каждого из указанных символов следует номер соответствующего автомата или воздействия.

Работу достаточно сложной технологической системы, которой, например, является автоматическая линия, включающая в себя довольно большое количество различного оборудования (металлорежущие станки, накопители, роботы, конвейерная система), можно представить с помощью теории конечных автоматов. В общем виде работу конечного автомата описывает уравнение:

$$Y = f_y(X, t).$$

Фактор времени в приведенном уравнении учитывается введением вектора состояний S, как своего рода «памяти о прошлом». Действительно, на один и тот же набор входных сигналов (значений компонентов вектора X) автомат будет выдавать разные выходные сигналы (значения компонентов вектора Y) в зависимости от состояния, в котором он находится в данный момент времени. Текущее состояние, в свою очередь, определяется алгоритмом функционирования автомата.

Рассмотрим характеристические функции автомата. Функция  $f_s$  реализует бинарное отношение вида  $S \times X \rightarrow S$ , то есть каждой паре «состояние – входной сигнал» ставит в однозначное соответствие определенное состояние из множества S. Аналогично, бинарное отношение для функции  $f_y$  имеет вид

$S \times X \rightarrow Y$ , то есть каждой паре «состояние – входной сигнал» ставится в соответствие конкретный выходной сигнал – элемент множества Y.

Таким образом, характеристические функции определяют, в какое состояние  $s \in S$  перейдет автомат в следующий, (t+1)-й момент времени и каково будет значение выходного сигнала  $y \in Y$  в текущий момент времени t:

$$\begin{aligned} s(t+1) &= f_s(x(t), s(t)) \\ y(t) &= f_y(x(t), s(t)) \end{aligned} \quad (1)$$

Из приведенных уравнений видно, что аргументами характеристических функций являются текущее значение входного сигнала и текущее состояние. Конечный автомат, заданный парой уравнений (1), называется автоматом I рода или, по имени автора модели, автоматом Мили (Mealy).

На практике часто встречаются автоматы, выходные сигналы которых в момент времени t однозначно определяются текущим состоянием автомата и не зависят от компонентов вектора входных сигналов:

$$\begin{aligned} s'(t+1) &= f'_s(x(t+1), s'(t)) \\ y(t) &= f'_y(s'(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

Автомат, заданный парой уравнений (2), называют автоматом II рода или автоматом Мура (Moore). Штрих введен в обозначения для отличия записи функций и состояний автомата Мура от автомата Мили. Заметим, что автомат Мили по отношению к автомату Мура «запаздывает» на один дискретный момент времени по входному сигналу. Автоматы I и II рода являются двумя базовыми моделями теории автоматов.

Сложные технологические системы, каковыми в частности являются агрегатированные комплексы

наиболее целесообразно представлять посредством конечных автоматов Мили, так как принципиальное значение имеет состояние входов автоматов на начало работы.

Рассмотрим простейший вариант схемы алгоритма функционирования конечного автомата. Пусть требуется получить математическую модель автомата, алгоритм функционирования которого задан описанием: автомат имеет два входа  $x_1, x_2$  и один выход  $y$ . В качестве автомата рассмотрим накопитель, который имеет два входа  $x_1$  - накопитель в исправном состоянии,  $x_2$  - накопитель в аварийном состоянии. В начальный момент времени  $y=0$ . На вход подаются сигналы  $(x_1, x_2) = (0,0), (0,1), (1,0), (1,1)$ . В случае входной комбинации  $(1,0)$  на выходе формируется значение 1 (наличие заготовки в рабочей зоне); если  $(x_1, x_2) = (0,1)$ , то выдается  $y=2$  (отсутствие заготовки в в рабочей зоне). В остальных случаях  $y=0$  (вне-

штатная ситуация, требующая вмешательства оператора).

Зададим множества, входящие в описание модели.

1.  $X = \{(0,0), (0,1), (1,0), (1,1)\}$ , где первый элемент каждой пары соответствует  $x_1$ , второй элемент –  $x_2$ . Для краткости запишем:  $X = \{00, 01, 10, 11\}$ .
2.  $Y = \{0, 1, 2\}$ .
3. Множество состояний  $S$  должно быть сформировано так, чтобы обрабатывалась каждая ветвь алгоритма функционирования автомата. Для этого алгоритм представим в виде схемы, иногда называемой граф-схемой алгоритма. Если каждый шаг алгоритма принять за микрокоманду, то схема алгоритма является наглядным изображением микропрограммы автомата как последовательности микрокоманд.

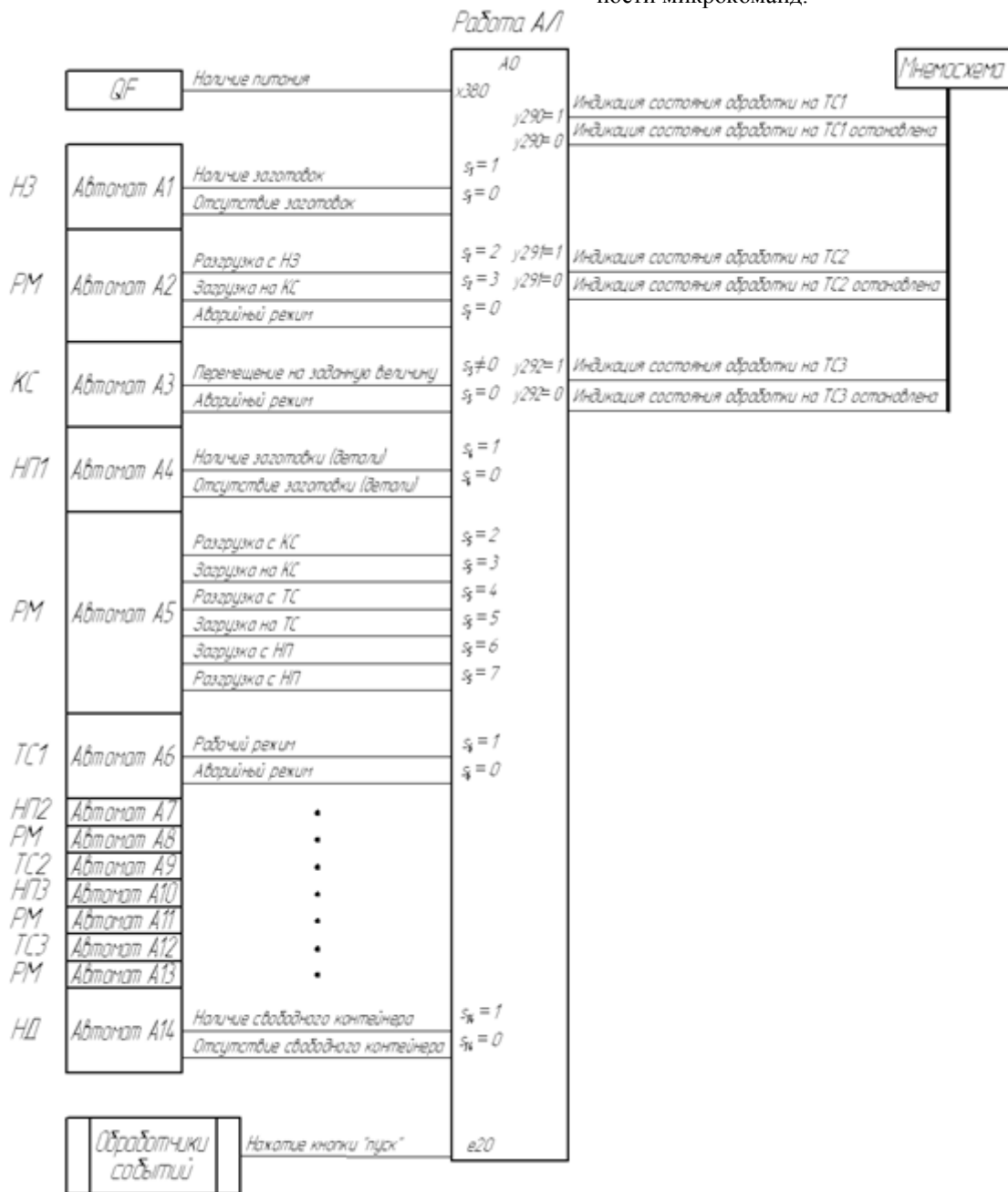


Рис.1 – Схема связей автоматической линии

Схема алгоритма заданного автомата представлена на рис. 2

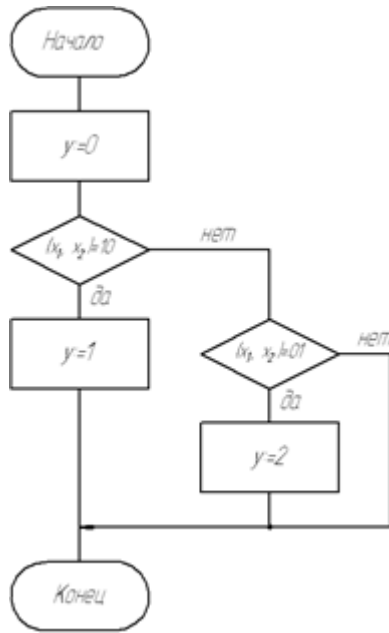


Рис. 2 – Схема алгоритма функционирования конечного автомата

Состояния определим путем разметки схемы по следующим правилам, различным для моделей Мили и Мура.

Модель Мили.

- 1). Вход блока, следующего за начальным, и вход конечного блока отвечают состоянию  $s_0$ .
- 2). Вход блока, следующего за операторным, отвечает состоянию  $s_i$ , где  $i = 1, 2, \dots$  – номер операторного блока).

Заметим, что разметка отражает цикличность работы автомата. На уровне модели цикл бесконечный: алгоритм и начинается, и завершается состоянием  $s_0$ . В схемотехнической реализации функционирование продолжается, пока на электрическую схему автомата подается питание или действует разрешающий сигнал от автомата более высокого уровня иерархии.

Разметка схемы алгоритма для модели Мили показана на рис. 3. Имеем множество состояний:  $S = \{s_0, s_1\}$ .

Построим взвешенный орграф переходов автомата Мили. Вершины графа соответствуют состояниям автомата. Дуга, направленная из вершины  $s_i$  в вершину  $s_j$ , задает переход вида:

$$s_i \xrightarrow{f_s} s_j$$

Переход инициируется входным сигналом  $x_k \in X$ . На переходе формируется выходной сигнал  $y_m \in Y$ . Поэтому весом дуги является пара «вход/выход»:  $x_k/y_m$ .

Проанализируем условия переходов. Переход конечного автомата из состояния  $s_0$  в состояние  $s_1$  является безусловным: булева функция, описывающая такой переход, тождественно равна единице, на графе соответствующая дуга будет помечена «1».

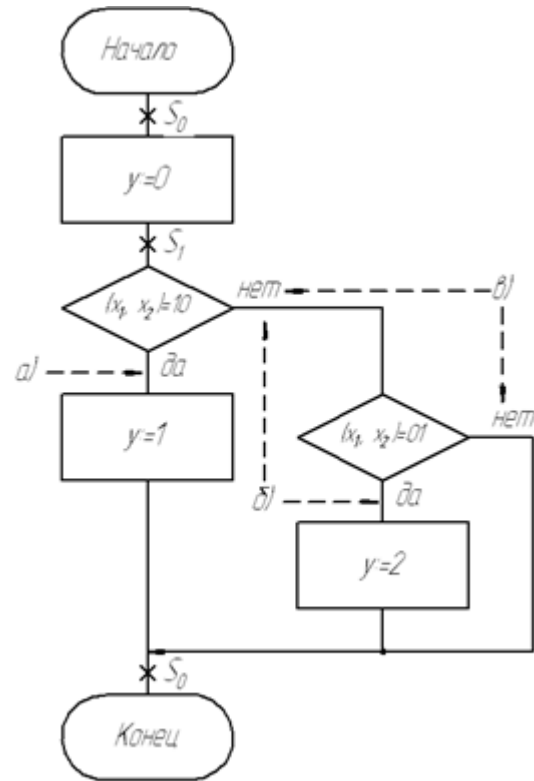


Рис. 3 – Разметка схемы алгоритма (модель Мили)

Обратный переход из  $s_1$  в  $s_0$  возможен по трем ветвям алгоритма. На рис. 3. они обозначены как а), б), в) и указаны пунктирными стрелками. Условие прохода по каждой из ветвей представим в дизъюнктивной нормальной форме:

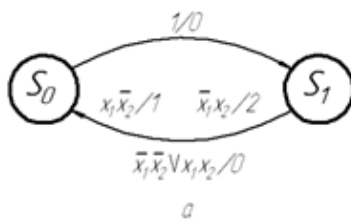
- а)  $x_1 \bar{x}_2$  – истинно первое условие  $(x_1, x_2) = 10$ , выдается выходной сигнал  $y = 1$ ;
- б)  $\bar{x}_1 \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 x_2 = (\bar{x}_1 \vee x_2) \wedge \bar{x}_1 x_2 = \bar{x}_1 x_2$  – ложно первое условие, истинно второе условие  $(x_1, x_2) = 01$ ,  $y = 2$ ;
- в)  $x_1 \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1 x_2 = (\bar{x}_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee \bar{x}_2) = \bar{x}_1 \bar{x}_2 \vee x_1 x_2$  – ложны оба условия, на данной ветви алгоритма операторные блоки отсутствуют, на выходе автомата сохраняется прежний сигнал  $y = 0$ .

Граф переходов показан на рис. 4,а. Веса дуг записаны в формате «вход/выход». Подчеркнем, что в автомате Мили выходной сигнал формируется именно на переходе конечного автомата из одного состояния в другое. Это становится понятным, если принять во внимание, что функция выходов автомата Мили зависит от двух аргументов: входного сигнала и текущего состояния. В процессе разметки схемы алгоритма каждый операторный блок оказывается между двумя состояниями, причем переход от одного к другому либо безусловный, когда операторные блоки расположены один за другим, либо условный, когда между операторными блоками присутствует не менее одного блока ветвления (см. рис. 3).

В данном примере действие, заключенное в операторный блок, состоит именно в выработке выходного сигнала. Если схема алгоритма отражает микропрограмму функционирования некоторого операционного автомата, например, умножения чисел, то в

операторных блоках будут присутствовать действия над данными, например, сдвиг множимого в регистре, сложение частичной суммы и множимого на сумматоре и тому подобное. Но каждому действию соответствует иницирующий сигнал, вырабатываемый управляющим автоматом, который и задает требуемую алгоритмом последовательность микрокоманд.

На рис. 4,б приведена построенная по графу таблица переходов/выходов конечного автомата Мили. Строки таблицы соответствуют состояниям автомата, левая подтаблица отражает значения выходного сигнала в момент времени  $t$  для каждой пары «состояние – набор входных сигналов», правая подтаблица показывает, в какое состояние переходит автомат в следующий момент времени из данного состояния под воздействием каждого набора входных сигналов.



		$y(t)$				$s(t+1)$			
		$\bar{x}_1\bar{x}_2$	$\bar{x}_1x_2$	$x_1\bar{x}_2$	$x_1x_2$	$\bar{x}_1\bar{x}_2$	$\bar{x}_1x_2$	$x_1\bar{x}_2$	$x_1x_2$
$S_0$	0	0	0	0	$S_1$	$S_1$	$S_1$	$S_1$	
$S_1$	0	2	1	0	$S_0$	$S_0$	$S_0$	$S_0$	

Рис. 4 – Результат абстрактного синтеза автомата Мили: а – граф переходов; б – таблица переходов/выходов

**Модель Мура.**

Разметка схемы алгоритма состоит в следующем.

1). Начальному и конечному блокам сопоставляют состояние  $s_0$ .

2). Каждому операторному блоку ставится в соответствие состояние  $s_i$ , где  $i = 1, 2, \dots$

Таким образом, каждое состояние автомата Мура связано с действием, и обратно – каждое действие, то есть значение выходного сигнала, приписывается определенному состоянию. Напомним, что единственным аргументом функции выходов автомата Мура является его состояние в текущий момент времени.

Разметка схемы алгоритма для случая конечного автомата Мура показана на рис. 5.

Имеем множество состояний:  $S' = \{s_0', s_1', s_2', s_3'\}$ . Условия переходов (на рис. 5 отмечены пунктирными стрелками) таковы:

- а)  $s_0' \rightarrow s_1'$  – безусловно;
- б)  $s_1' \rightarrow s_2' - \bar{x}_1\bar{x}_2$ ;
- в)  $s_1' \rightarrow s_3' - \bar{x}_1\bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1x_2 = \bar{x}_1x_2$ ;
- г)  $s_1' \rightarrow s_0' - \bar{x}_1\bar{x}_2 \wedge \bar{x}_1x_2 = \bar{x}_1\bar{x}_2 \vee x_1x_2$ ;
- д)  $s_2' \rightarrow s_0'$  – безусловно;

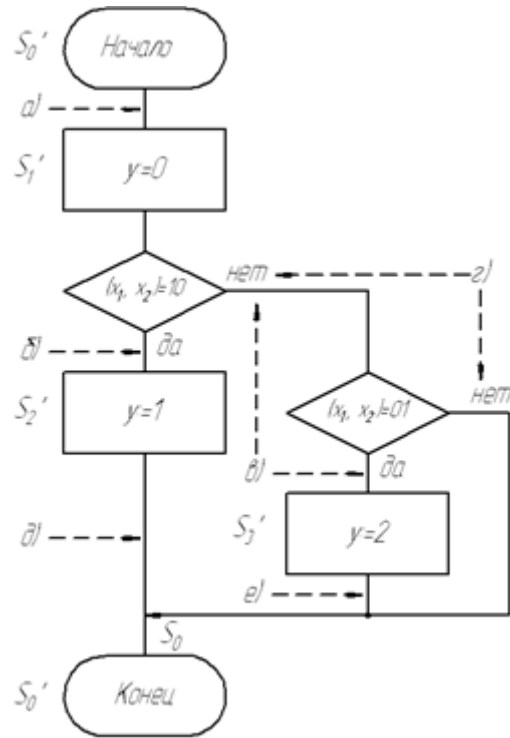


Рис. 5 – Разметка схемы алгоритма (модель Мура)

е)  $s_3' \rightarrow s_0'$  – безусловно.

Граф переходов КА Мура показан на рис. 6,а. Дуга графа, инцидентная вершинам  $s_i'$  и  $s_j'$ , задает переход вида:

$$s_i' \xrightarrow{f_s'} s_j'$$

Весом дуги является значение входного сигнала, инициировавшего переход. Так как выходной сигнал в момент времени  $t$  определяется исключительно текущим состоянием автомата, то обозначение выходного сигнала  $u_m$  на графе приписывается вершине  $s_i'$ , соответствующей состоянию, в котором этот выходной сигнал формируется.

Таблица переходов/выходов (рис. б) в отличие от модели Мили не разделяется на две подтаблицы – выходов и переходов, поскольку каждому состоянию соответствует определенное значение выходного сигнала независимо от сигналов на входах. Последние влияют только на переходы автомата: под воздействием каждого входного набора КА переходит из текущего состояния  $s'(t)$  в состояние  $s'(t+1)$  в соответствии с алгоритмом функционирования.

**Переход от одной модели к другой**

Обоснование возможности перехода от модели Мили к модели Мура. Запишем уравнение функции выходов автомата Мили:

$$y(t) = f_y^{Mи}(x(t), s(t)).$$

Так как автомат один и тот же, та же функция выходов в случае модели Мура описывается уравнением:  $y(t) = f_y^{Му}(s'(t))$ .

Следовательно, имеет место соответствие аргументов:  $s'(t) \approx [x(t), s(t)]$ .

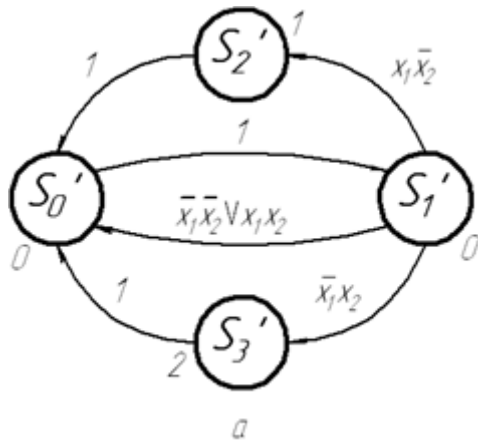
Если данное соответствие рассмотреть для момента времени  $(t+1)$ , получим:

$$s'(t+1) \approx [x(t+1), s(t+1)] = [x(t+1), f_s^{Mи}(x(t), s(t))].$$

Но  $s'(t+1) = f_s^{Му}(x(t+1), s'(t))$ . Тогда

$$f_s^{My}(x(t+1), s'(t)) \approx [x(t+1), f_s^{Mi}(x(t), s(t))].$$

Таким образом, зная функцию переходов автомата Ми  $f_s^{Mi}$ , можно перейти к функции переходов автомата Мура  $f_s^{My}$ .



$y(t)$	0	0	1	2
$S'(t)$	$S_0'$	$S_1'$	$S_2'$	$S_3'$
$x_1x_2$	$S_1'$	$S_0'$	$S_0'$	$S_0'$
$x_1\bar{x}_2$	$S_1'$	$S_3'$	$S_0'$	$S_0'$
$\bar{x}_1x_2$	$S_1'$	$S_2'$	$S_0'$	$S_0'$
$\bar{x}_1\bar{x}_2$	$S_1'$	$S_0'$	$S_0'$	$S_0'$

Рис. 6 –Результат абстрактного синтеза автомата Мура: а – граф переходов; б – таблица переходов/выходов

Вышесказанное может быть использовано при использовании модели Мура в случае, когда принципиальное значение имеет наблюдение за сложной агрегатированной технологической системой в конкретный момент или заданный промежуток времени. Например, в наладочном режиме при пуске конкретной автоматической линии.

**Выводы**

Использование конечных автоматов для управления сложными технологическими автоматизированными системами является целесообразным и обоснованным и позволит повысить качество проектирования.

Применение предложенных подходов позволяет выбрать структуру сложной технологической системы, согласовать работу единиц оборудования, выявить «узкие места» в работе единиц автоматической линии, определить емкости промежуточных накопителей, оценить уровень отказоустойчивости системы, определить влияние времени переналадки оборудования на производительность системы.

**Список літератури**

1. Айзерман М. А. Логика. Автоматы. Алгоритмы./М.А. Айзерман, Л.А. Гусев, Л.И. Розоноэр, И.М. Смирнова, А.А. Таль. Гос. изд. физ.-мат. литературы 1963
2. Белоусов А. И. Дискретная математика/ А.И. Белоусов, С.Б. Ткачев. — М. : МГТУ, 2006. — 744 с.
3. Джон Хопкрофт, РадживМотвани, Джеффри Ульман. Глава 8. Введение в теорию машин Тьюринга // Введение в теорию автоматов, языков и вычислений - IntroductiontoAutomataTheory, Languages, andComputation. — М.: «Вильямс», 2002. — 528 с.
4. Букатова И.Л. Эволюционное моделирование и его приложения. — М.: Наука, 1979. — 134 с.
5. Mealy George H. A Method to Synthesizing Sequential Circuits. — Bell Systems Technical Journal. — P. 1045–1079.
6. Приходько О.Ю. Вопросы алгоритмизации работы технологических систем с использованием SWITCH- технологии./ О.Ю. Приходько, А.Н. Ушаков,С.Е. Слипченко С.Е. // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Технології в машинобудуванні» – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 66-70.

**Bibliography (transliterated)**

1. Ajzerman M.A., Gusev L.A., Rozonoer L.I., Smirnova I.M., Tal A.A. *Logika. Avtomati. Algoritmi*. [Logic. Automats. Algorithms.] Gos. Publ. fiz.-mat. Literature. 1963.
2. Belousov A.I., Tkachev S.B. *Diskretnaja matematika* [Discrete mathematics]. Moscow, MG TU, 2006. 744 p.
3. Hopcroft Djon, Motvani Radgiv, Ulman Djeffry. Glava 8. *Vvedenie v teoriju mashin Tjuringa/VVedenie v teoriju avtomatov, jazikov I vichislenij* [Introduction to the theory of machines of Turing // Introduction to the theory of automata, languages and calculations] IntroductiontoAutomataTheory, Languages, and Computation. — Moscow, : «Wiljams», 2002. — 528 p.
4. Bukatova I.L. *Evolucionnoe modelirovanie I ego prilogenija* [Evolutional design and his applications.] Moscow, Nauka Publ., 1996. 352 p.
5. Mealy George H. A Method to Synthesizing Sequential Circuits. — Bell Systems Technical Journal. — P. 1045–1079.
6. Prihodko O.Y., Ushakov O.M., Slipchenko S.E. *Voprosi algoritimizacii raboti tehnologicheskix sistem s ispolzovaniem SWITCH-tehnologii* [Questions of algorithmization of work of the technological systems with the use of SWITCH are technologies.]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Khar'kov, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 5, pp. 66–70

Поступила (received) 12.11.16

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description*

**Моделирование структур и систем управления циклом агрегатированных технологических систем на основе конечных автоматов / А.А.Пермяков, О.Ю. Приходько, С.Е. Слипченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 74–80. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Моделирование структур та систем управління циклом агрегованих технологічних систем на основі кінцевих автоматів О.А. Пермяков, О.Ю. Приходько, С.Е. Слипченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 74–80. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Design of structures and control system by the cycle of the packaged technological systems on the basis of eventual automats / O.A. Permyakov, O.Y. Prihodko, S.E. Slipchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.74–80. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Пермяков Олександр Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: perm\_a@i.ua;

**Пермяков Александр Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: perm\_a@i.ua;

**Permyakov Oleksandr Anatoliyovych** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (057)-720-66-25, e-mail: perm\_a@i.ua;

**Приходько Ольга Юрївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru;

**Приходько Ольга Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru;

**Prihodko Olga Yurievna** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (057)-720-66-25, e-mail: olmurakami@mail.ru;

**Сліпченко Сергій Євгенович** – старший викладач Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: serg.slip@gmail.com;

**Слипченко Сергей Евгеньевич** – старший преподаватель, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: serg.slip@gmail.com;

**Slipchenko Sergij Evgenovych** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Senior Lecturer; tel.: (057)-720-66-25, e-mail: serg.slip@gmail.com



УДК 621.9

Г. И. КОСТЮК, О. О. БРУЯКА, Е. А. ВОЛЯК

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОСТРУКТУР НА ОДНО-, ДВУХ- И ТРЕХКАРБИДНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Розглянуто можливості отримання наноструктур на одно-, дво- і трикарбідних сплавах при дії фемто- і пікосекундних лазерів. Визначено залежності максимальної температури, швидкості її росту і температурних напружень від щільності теплового потоку ( $10^{12}...10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) і за часу його дії від  $10^{-16}$  до  $10^{-12}$  с. Доведено, що великі температури, швидкості наростання температур і температурні напруження реалізуються для трикарбідного твердого сплаву ТТ20К9, найменші – для однокарбідного твердого сплаву ВК4. Аналіз швидкостей зростання показує, що для всіх досліджених режимів вона перевищує необхідну для утворення наноструктур –  $10^7$  К/с. Максимальні температурні напруження для ряду режимів перевищують  $10^{10}$  Па, що дозволяє отримувати безпосередньо наноструктури за рахунок дії температурних напружень, а для широкого кола режимів вони істотно прискорюють процес утворення наноструктур. Отримані значення об'єму зерна і глибин його залягання дозволили знайти технологічні режими для отримання наноструктур. Подані залежності обсягу наноструктур від технологічних параметрів (щільності теплового потоку і часу його дії) дозволяють проводити експрес-оцінку технологічних параметрів отримання наноструктур.

**Ключові слова:** наноструктури, фемто- і піко секундні лазери, щільність теплового потоку, час дії лазера, твердий сплав одно-, дво-, трикарбідний.

Рассмотрены возможности получения наноструктур на одно-, двух- и трехкарбидных сплавах при действии фемто- и пикосекундного лазера. Определены зависимости максимальной температуры, скорости её роста и температурных напряжений от плотности теплового потока ( $10^{12}...10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) и при времени его действия от  $10^{-16}$  до  $10^{-12}$  с. Показано, что большие температуры, скорости нарастания температур и температурные напряжения реализуются для трехкарбидного твердого сплава ТТ20К9, наименьшие – для однокарбидного твердого сплава ВК4. Анализ скоростей роста показывает, что для всех исследованных режимов она превышает необходимую для образования наноструктур –  $10^7$  К/с. Максимальные температурные напряжения для ряда режимов превышают  $10^{10}$  Па, что позволяет получать непосредственно наноструктуры вследствие действия температурных напряжений, а для широкого круга режимов они существенно ускоряют процесс образования наноструктур. Полученные значения объёма зерна и глубины его залегания позволили найти технологические режимы для получения наноструктур. Представленные зависимости объёма наноструктур от технологических параметров (плотности теплового потока и времени его действия) позволяют проводить экспресс-оценку технологических параметров получения наноструктур.

**Ключевые слова:** наноструктуры, фемто- и пикосекундные лазеры, плотность теплового потока, время действия лазера, твердый сплав одно-, двух- трехкарбидный.

Discusses the possibility of producing nanostructures of one-, two- and three carbide hard alloys under the action of femtosecond and picosecond lasers. The dependence of the maximum temperature, the speed of its growth and thermal stresses of the heat flux density ( $10^{12}...10^{16}$  W/m<sup>2</sup>), and at times his actions from  $10^{-16}$  до  $10^{-12}$  s. It is shown that high temperatures, the rate of rise of temperature and thermal stresses are realized for three carbide WC71TiC20Co9, the least – for one carbide WC96+Co9. Analysis of growth rates shows that for all she studied modes higher than necessary for the formation of nanostructures –  $10^7$  K/s. The maximum thermal stress for a number of modes higher than  $10^{10}$  Pa, which allows to obtain the nanostructure is directly due to the effect of thermal stresses, and a wide range of modes they significantly accelerate the process of formation of nanostructures. The values obtained for the grain size and the depth of their occurrence it possible to find technological modes for nanostructures. Presented according to the volume of nanostructures on the technological parameters of the heat flux density and time of action allow for a rapid assessment of the technological parameters of obtaining nanostructures.

**Keywords:** nanostructures, femtosecond and picosecond lasers, heat flux, while the laser action, hard alloy single, double and three carbide.

**Введение.** Возможность применения одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавов определяется их работоспособностью и эффективностью, поэтому образование наноструктур (НС) в их поверхностном слое может существенно изменить их работоспособность и эффективность. Учитывая различную стоимость одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавов (ТС), важно определить, какой из них позволяет получать наномерно при работе лазера пико- и фемтосекундном диапазоне времени, что позволит выбрать технологические режимы их обработки и наиболее работоспособный и эффективный сплав.

Всё это говорит о важности своевременности проведения исследования влияния типа материала твердого сплава на их эффективность и работоспособность.

**Состояние вопроса.** В настоящее время существует значительное количество экспериментальных работ по исследованию и применению наноструктур [1–17]. Однако теоретических работ с учетом критериев образования наноструктур, энергии, затрачиваемой на кристаллизацию, и квантово-механических эффектов в настоящее время нет для случая действия ионизирующего излучения, хотя некоторые попытки

в этом плане проводились [16, 17], но в этом случае рассматривались классические режимы при относительно большом времени действия лазерного луча.

Проведенный анализ показывает, что оценка возможности получения наноструктур на одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавах является актуальной и важной задачей современного машиностроения.

**Постановка теоретической задачи исследования.** Решалась совместная задача теплопроводности и термоупругости, которая позволяет не только учесть все основные источники и истоки темпа, но и проследить динамику преобразования энергии деформирования в тепло и в создание остаточных напряжений.

В результате решения этой задачи определялись температуры, скорости изменения температуры, температурных напряжений от плотности теплового потока ( $q = 10^{12}...10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) при времени его действия от  $10^{-16}$  до  $10^{-10}$  с, т. е. этот диапазон охватывает как пико-, так и фемтосекундные импульсы.

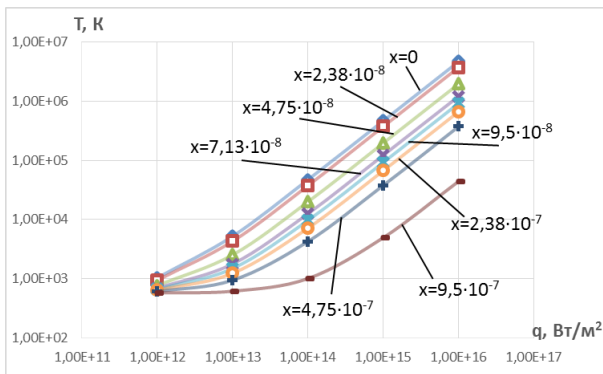
Также необходимо было найти объём наноструктуры, получаемой в каждом из исследованных режимов, что сводилось к нахождению области материала, где выполнялись условия для образования наноструктур по таким критериям: обеспечение требуемого

© Г. И. Костюк, О. О. Бруяка, Е. А. Воляк, 2016

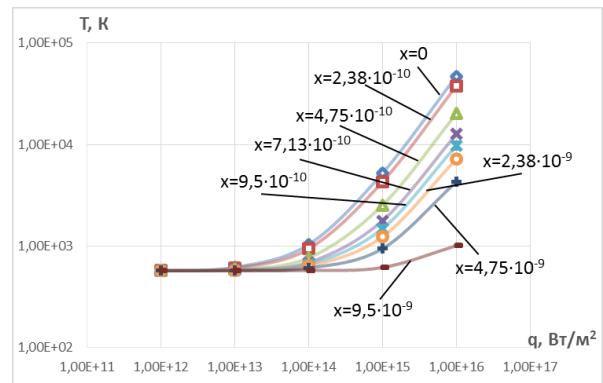
диапазона температур, скоростей роста температур более, чем в  $10^7$  К/с, и обеспечение действия температурных напряжений, ускоряющих образование НС ( $\sigma = 10^8 \dots 10^9$  Па) или реализация условий, когда есть вероятность образования наноструктур только вследствие действия температурных напряжений.

**Результаты исследований и их обсуждение.**

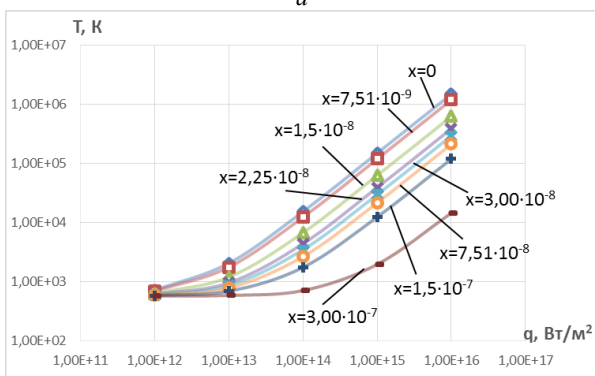
Проводилось исследование таких твердых сплавов: ВК4, Т5К10 и ТТ20К9. Видно, что во всем исследованном диапазоне времен для плотности теплового потока  $10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> практически нет возможности получения наноструктур (рис. 1–3).



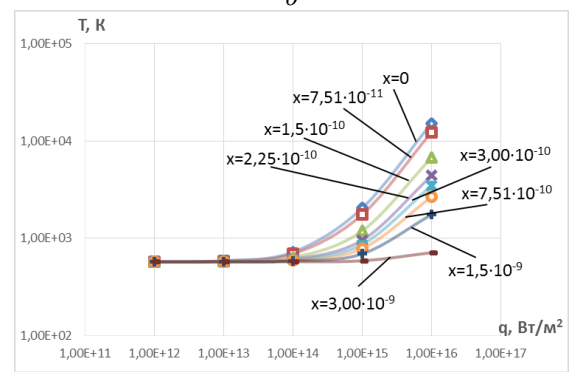
a



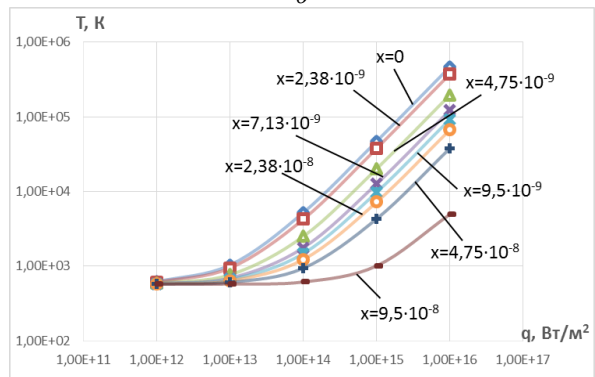
d



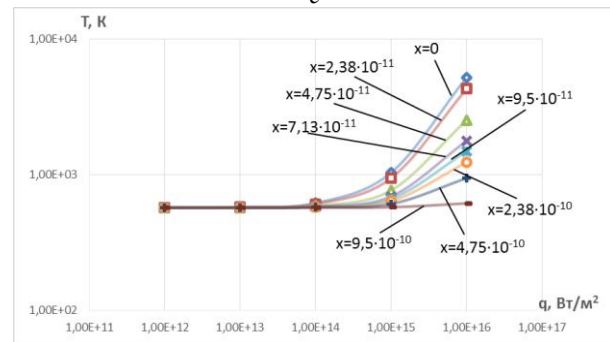
б



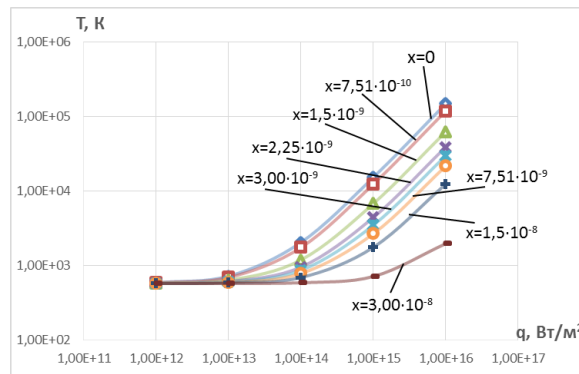
e



в



ж



з

Рис. 1 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия:

a –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; з –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

Повышение плотности теплового потока до  $10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> приводит к тому, что НС для всех исследованных материалов образуются, начиная с времени  $t = 10^{-13}$  до  $10^{-10}$  с, причем большие температуры реализуются для трехкарбидного сплава ТТ20К9, наименьшие – для однокарбидного ВК4. Переход плотности теплового потока  $10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup> расширяет область времени действия теплового потока, при котором реализуются наноструктуры до  $10^{-15}$  с, но и в

этом случае для однокарбидных сплавов реализуются температуры меньше, чем для трехкарбидных. В зоне высокого времени действия наноструктуры образуются на глубине  $2,41 \cdot 10^{-7}$  м. С понижением времени действия эта глубина уменьшается и становится порядка  $10^{-7}$  и даже приближается к поверхности режущего инструмента (РИ), причем большие значения наблюдается для трехкарбидного ТС ТТ20К9, а наименьшие – для однокарбидного ВК4 (рис. 1–3).

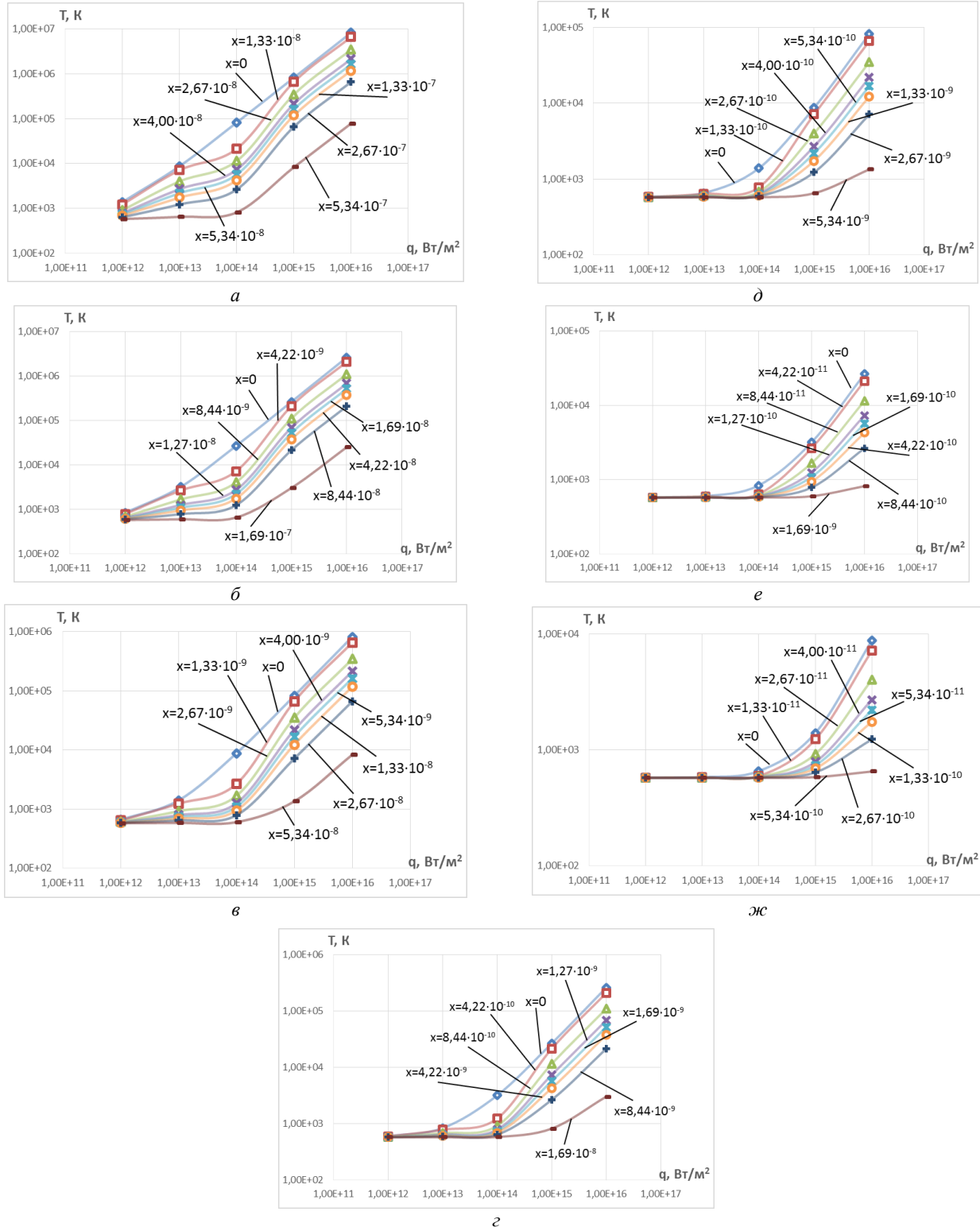


Рис. 2 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на Т5К10 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

Исследования остальных режимов при больших плотностях теплового потока  $10^{15}$  и  $10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> показывают, что в данном случае для всех режимов НС образуются на глубине, исключение составляют режимы от  $t = 10^{-15}$  до  $10^{-16}$  с, когда наноструктуры образуются даже на поверхности РИ, причем большие

глубины реализуются для трехкарбидного ТС (рис. 1–3). Анализ скоростей роста температур показывает, что практически во всех исследованных режимах скорость роста превышает  $10^7$  К/с, что говорит о том, что проверку по этому критерию в дальнейшем можно не проводить (рис. 4–6).

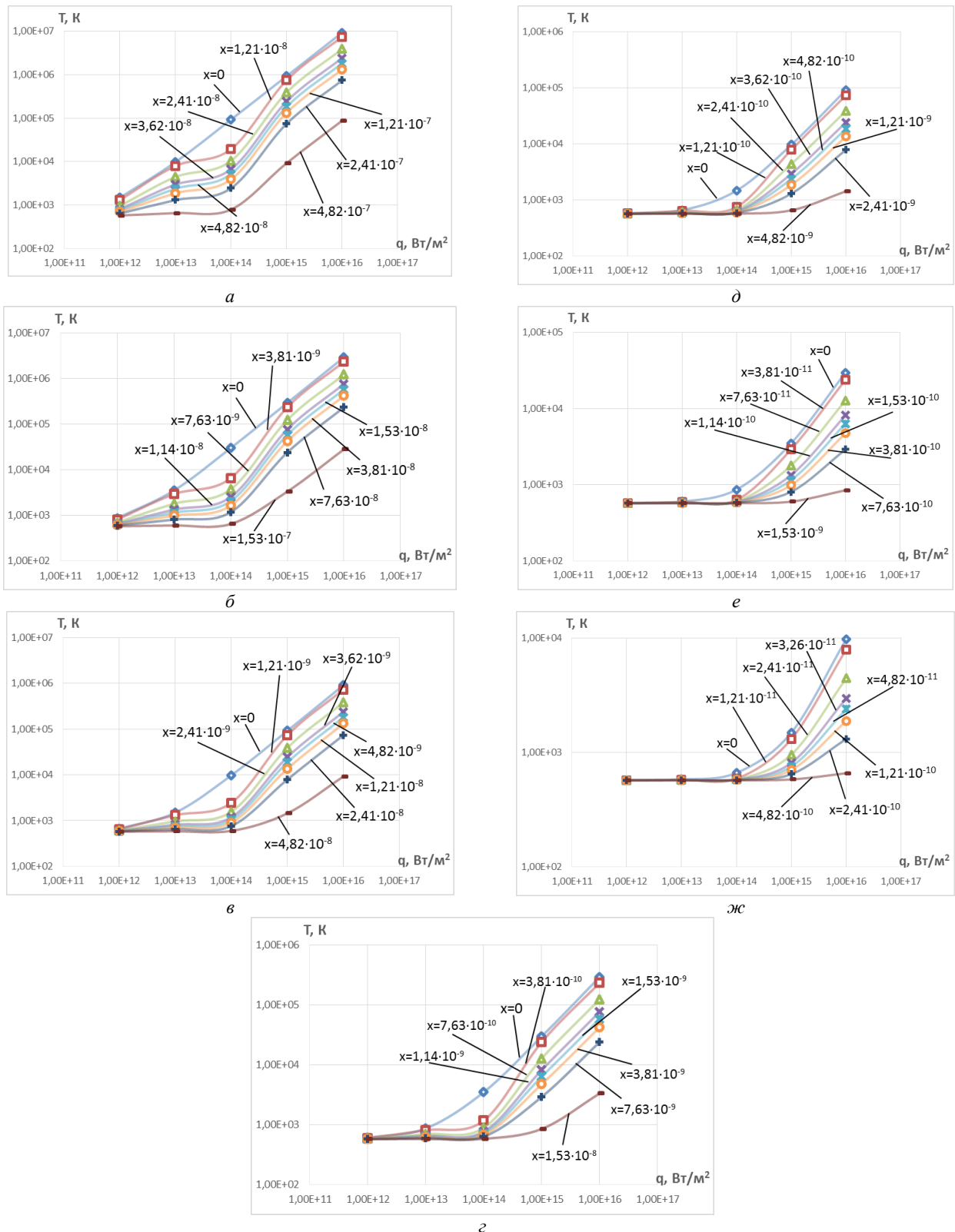


Рис. 3 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на ТТ20К9 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; з –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

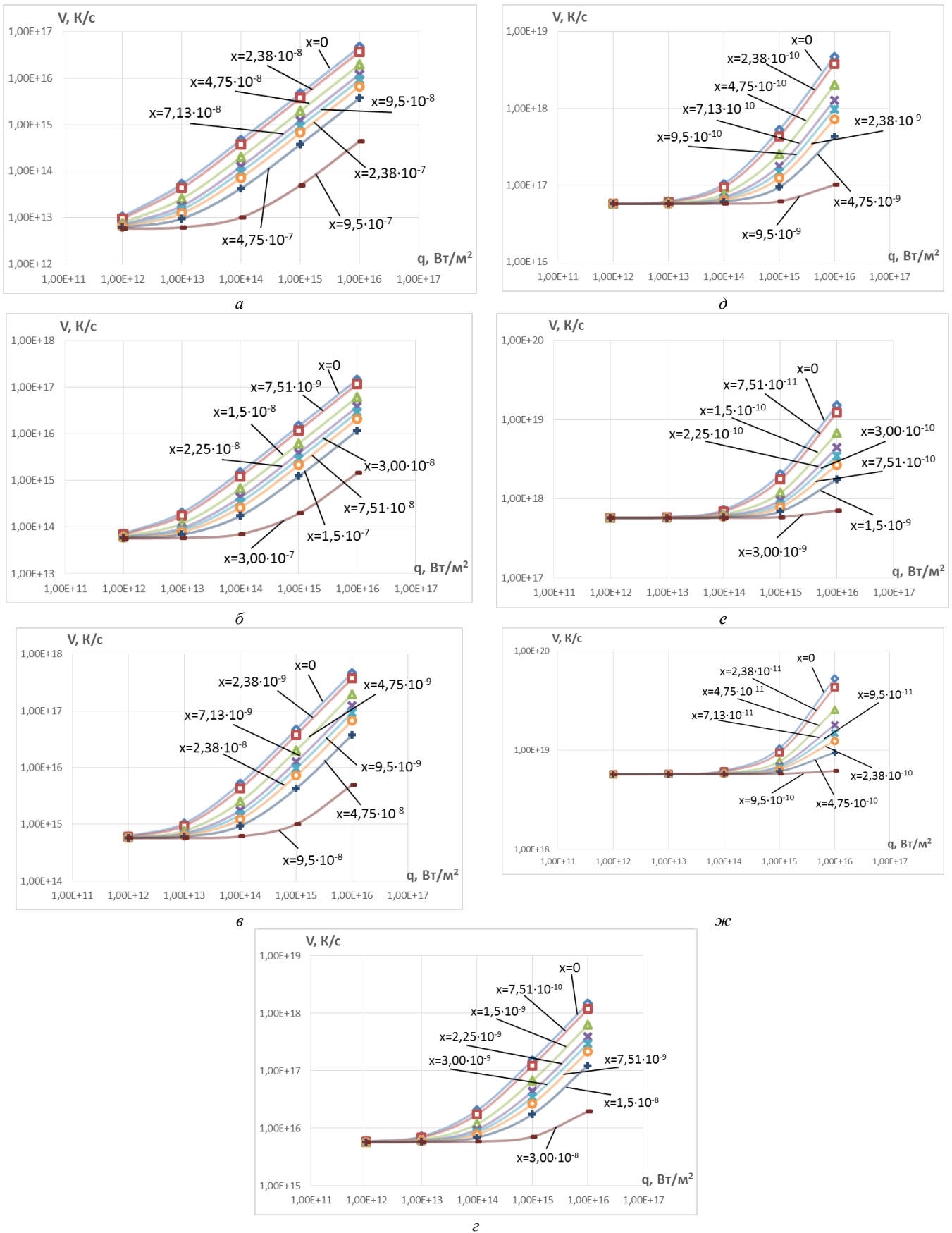


Рис. 4 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: *a* –  $t=10^{-10}$  с; *б* –  $t=10^{-11}$  с; *в* –  $t=10^{-12}$  с; *г* –  $t=10^{-13}$  с; *д* –  $t=10^{-14}$  с; *е* –  $t=10^{-15}$  с; *ж* –  $t=10^{-16}$  с

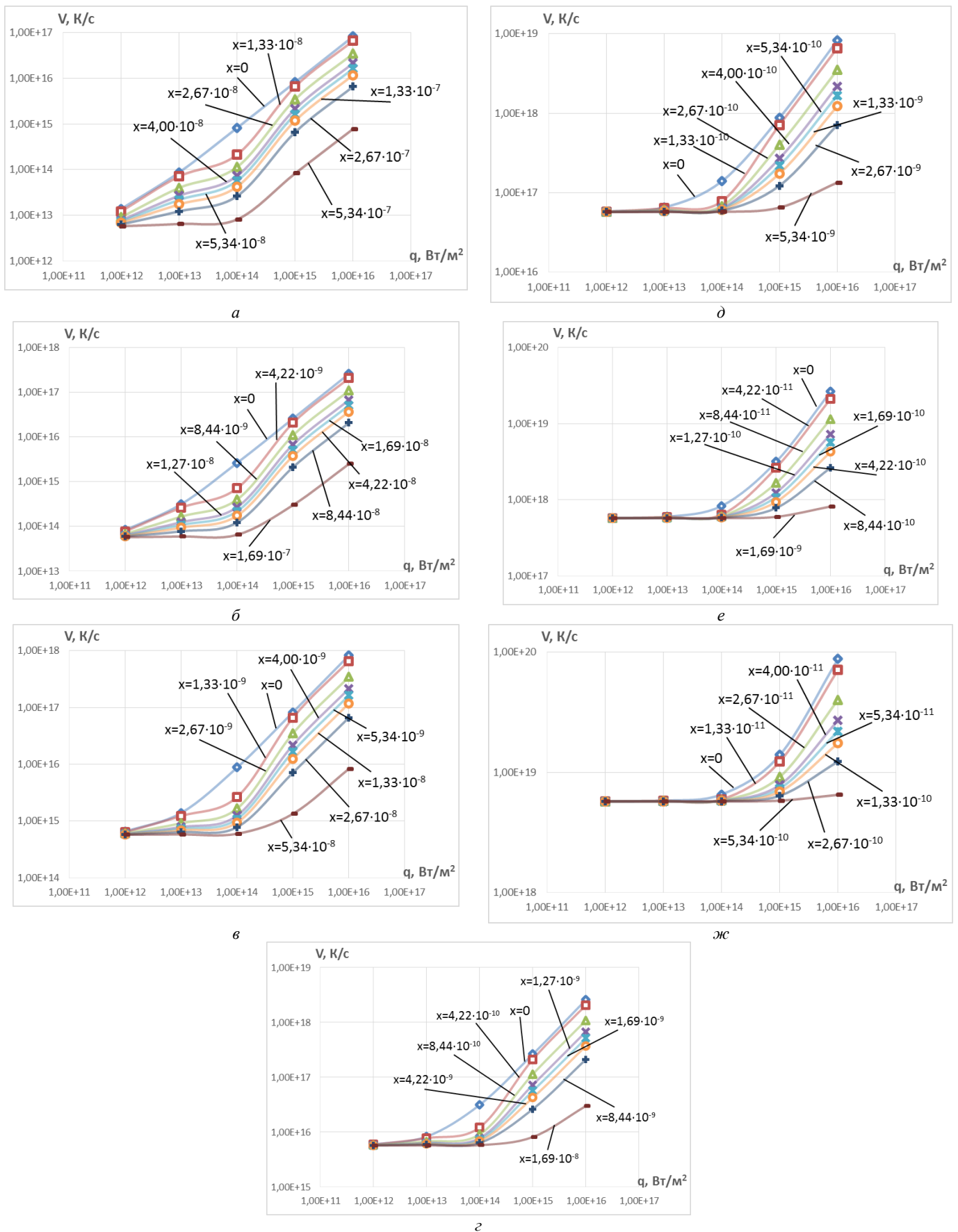


Рис. 5 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на Т5К10 от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; ж –  $t=10^{-16}$  с

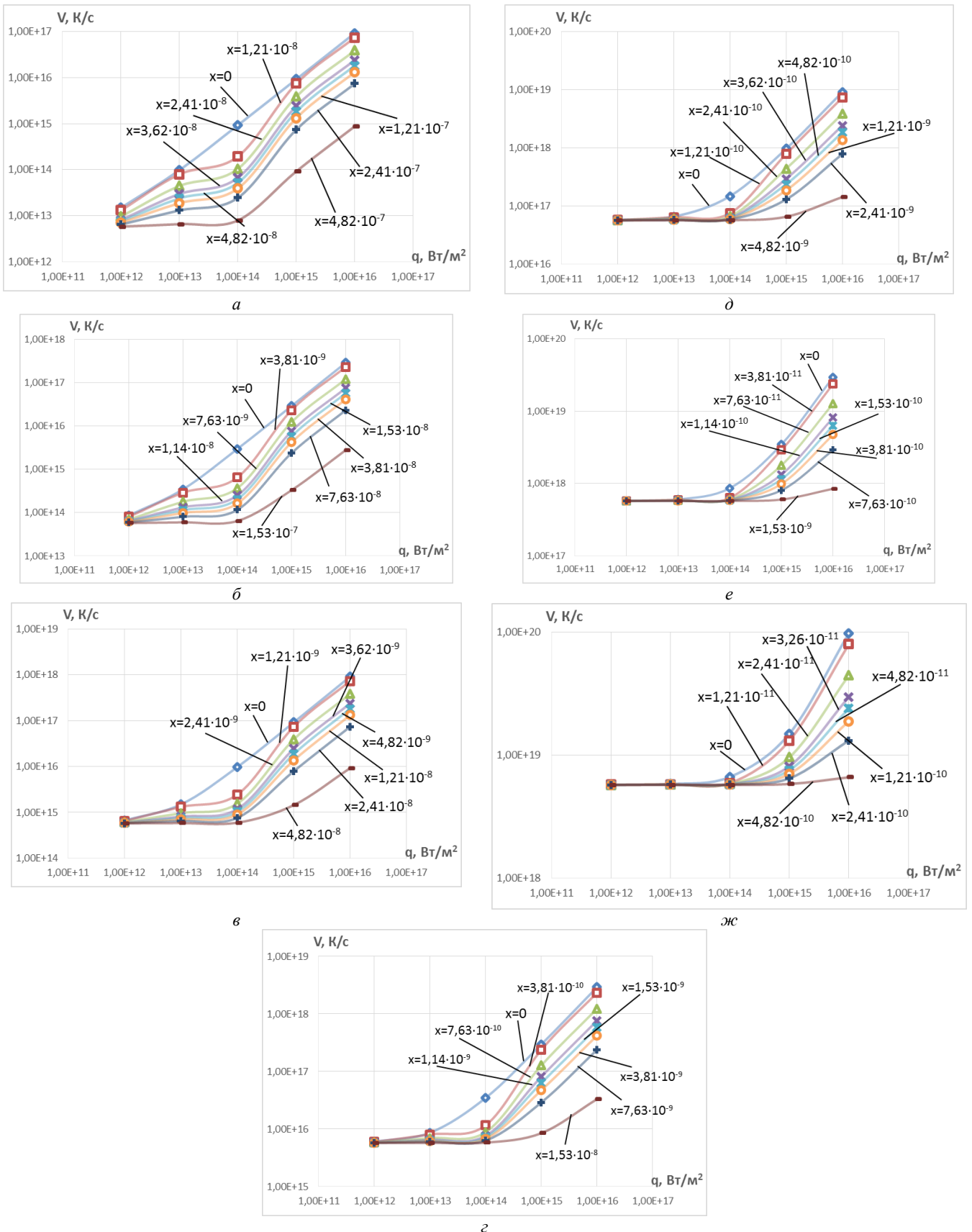


Рис. 6 – Зависимость скорости изменения температуры в зоне действия лазерного излучения на ТТ20К9 от плотности теплового потока на разной глубине  $x$  при времени действия:  $a - t=10^{-10}$  с;  $б - t=10^{-11}$  с;  $в - t=10^{-12}$  с;  $г - t=10^{-13}$  с;  $д - t=10^{-14}$  с;  $е - t=10^{-15}$  с;  $жс - t=10^{-16}$  с

Величины температурных напряжений существенно отличаются практически для всех режимов в зависимости от количества карбидов, участвующих в образовании ТС, причем значительно большие реали-

зуються для тріхкарбидного, а мінімальні – для однокарбидного. Для режимів при  $q = 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> єсть можливість суттєвого прискорення утворення наноструктур, а при  $q = 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> уже в двох режимах при  $t = 10^{-11} - 10^{-10}$  с (рис. 7–9). С ростом теплового потоку ( $q = 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>) з'являється можливість навіть непрямого утворення НС внаслідок дії температурних напружень на незначительних глибинах порядку  $10^{-8}$  і  $10^{-9}$  м. Для  $q = 10^{15}$  Вт/м<sup>2</sup> єсть можливість отримання наноструктур внаслідок

дії температурних напружень при часі  $10^{-13} \dots 10^{-10}$  с. В разі максимального теплового потоку ( $q = 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup>) єсть можливість утворення наноструктур при часі  $10^{-14} \dots 10^{-10}$  с, але як наноструктури звичайно реалізуються при двохосному стисненні, то єсть ймовірність того, що наноструктури можуть бути не утворені з-за того, що відносно іншої взаємно перпендикулярної осі значення температурних напружень можуть виявитися значно нижче досліджуваних (рис. 7–9).

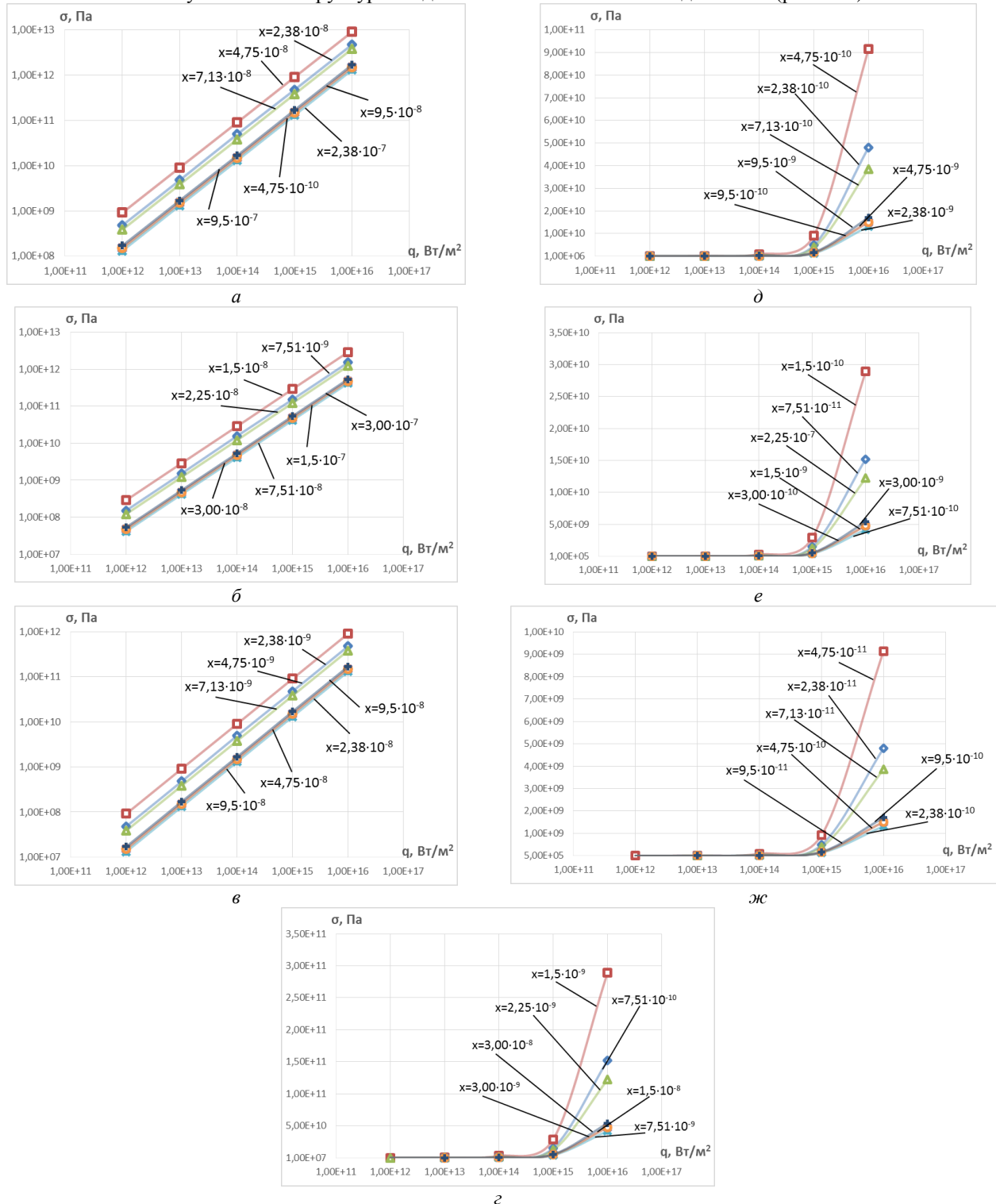
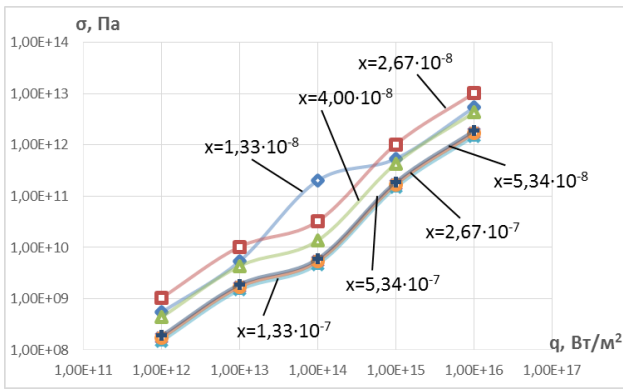
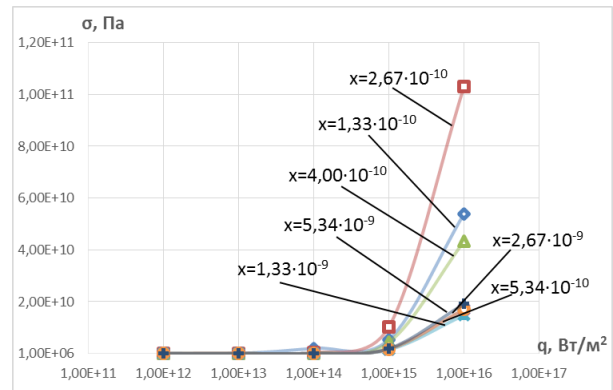


Рис. 7 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ВК4 от плотности теплового потока на разной глубине  $x$  при времени действия: а –  $t=10^{-10}$  с; б –  $t=10^{-11}$  с; в –  $t=10^{-12}$  с; г –  $t=10^{-13}$  с; д –  $t=10^{-14}$  с; е –  $t=10^{-15}$  с; жз –  $t=10^{-16}$  с

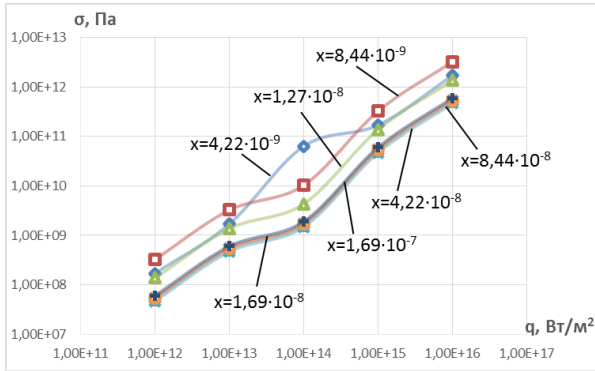




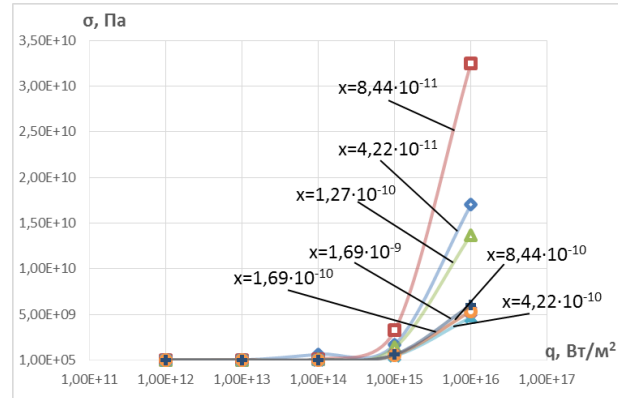
a



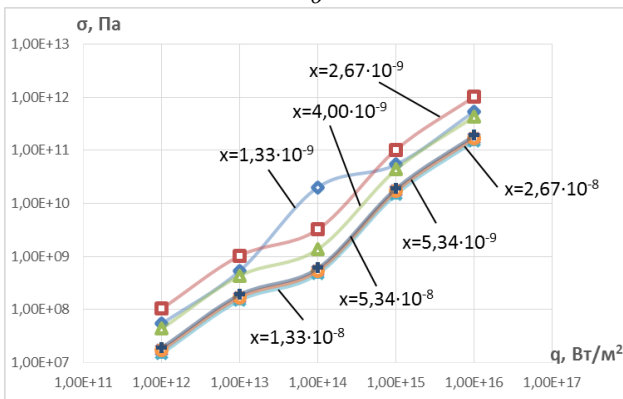
d



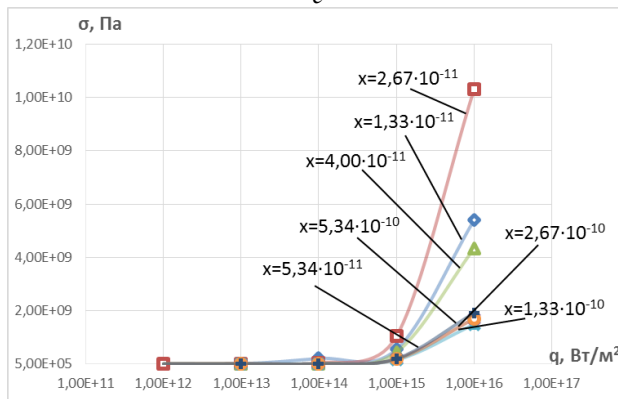
b



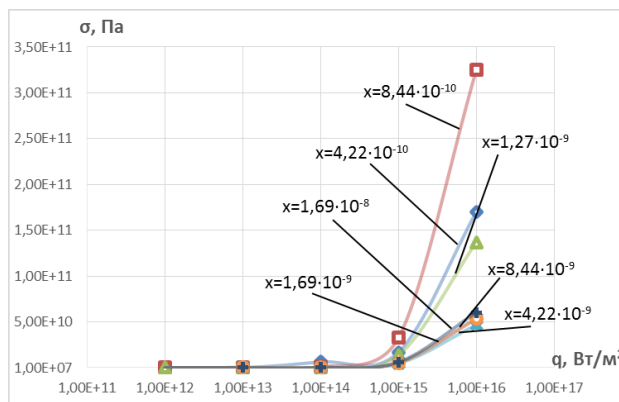
e



v



жс



z

Рис. 8 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на T5K10 от плотности теплового потока на разной глубине  $x$  при времени действия:  
 $a - t=10^{-10}$  с;  $b - t=10^{-11}$  с;  $v - t=10^{-12}$  с;  $z - t=10^{-13}$  с;  $d - t=10^{-14}$  с;  $e - t=10^{-15}$  с;  $жс - t=10^{-16}$  с

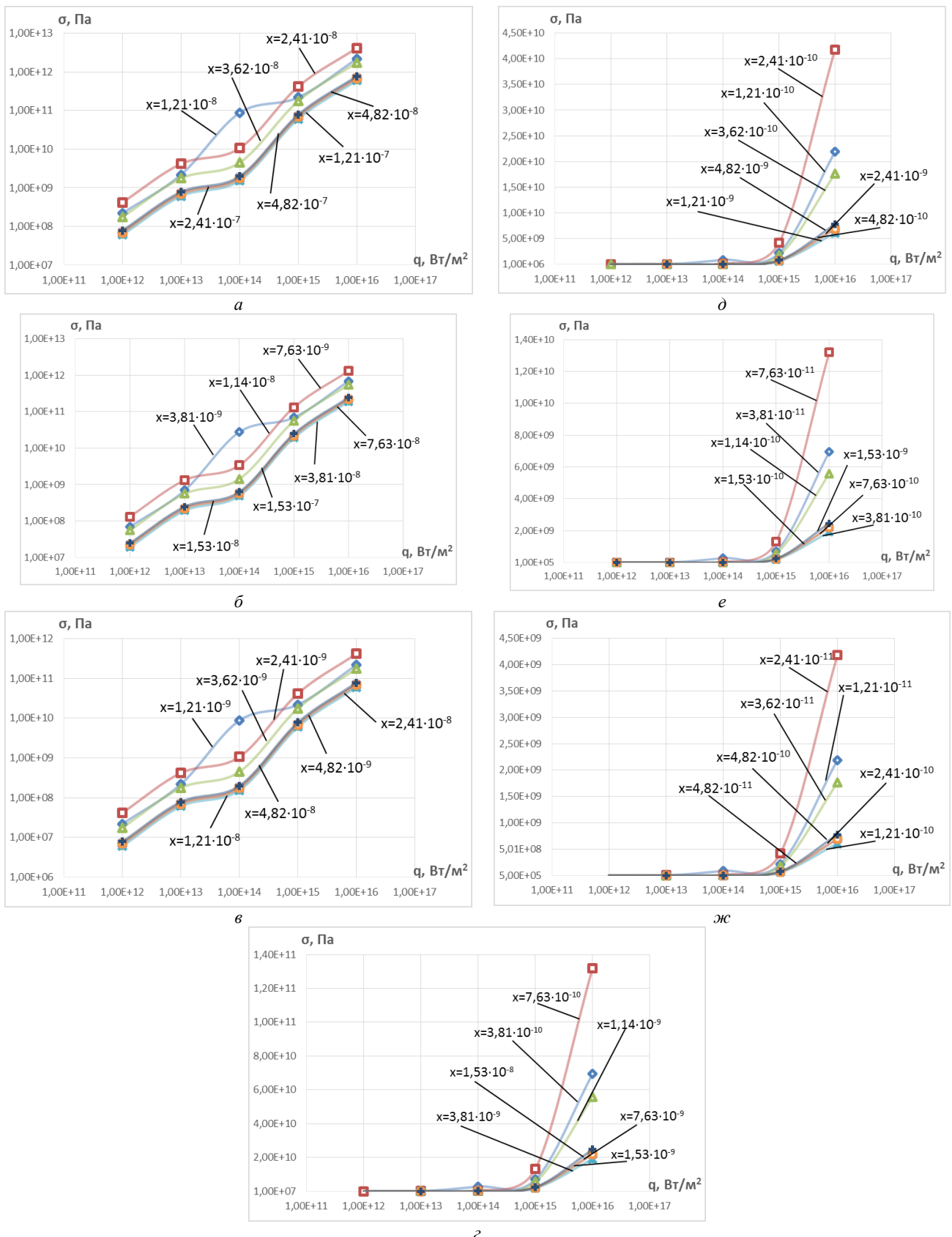


Рис. 9 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на ТТ20К9 от плотности теплового потока на разной глубине  $x$  при времени действия:  
 а –  $t = 10^{-10}$  с; б –  $t = 10^{-11}$  с; в –  $t = 10^{-12}$  с; г –  $t = 10^{-13}$  с; д –  $t = 10^{-14}$  с; е –  $t = 10^{-15}$  с; ж –  $t = 10^{-16}$  с

Так как важными характеристиками для получения наноструктурных слоев являются объемы НС и

глубина их залегания, то для исследованных сплавов были построены зависимости объема нанокластера от

минимальной и максимальной глубины залегания (рис. 10–12 для сплавов ВК4, Т5К10, ТТ20К9 соответственно). Видно, что объёмы структур существенно уменьшаются в обратном порядке: для ВК4 наблюда-

ется наибольший объём, а для ТТ20К9 – наименьший, что говорит о том, что вероятность появления наноструктур больше для твердого сплава ТТ20К9 (рис. 10–12).

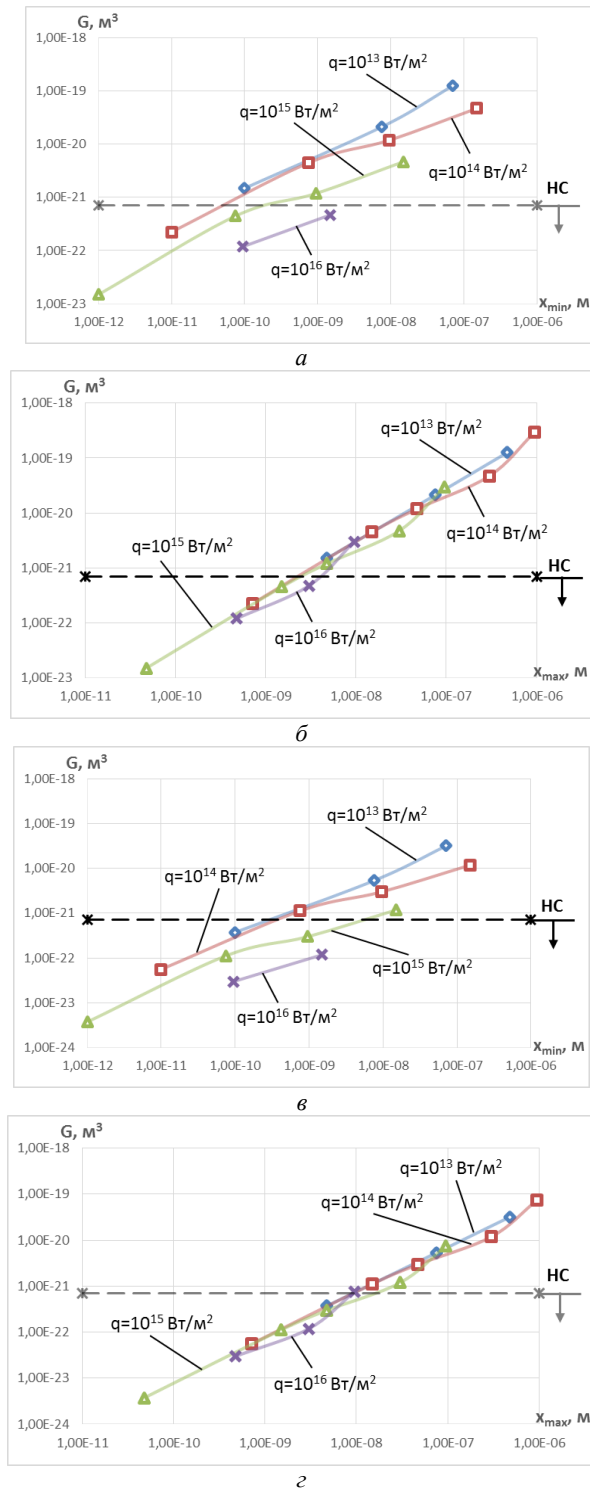


Рис. 10 – Зависимость объёма нанокластера от минимальной (а, в) и максимальной (б, г) глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (ВК4) при  $R = 10^{-6}$  м (а, б) и  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м (в, г) для ВК4

Для проведения экспресс-оценки технологических параметров получения наноструктур были построены пространственные картины зависимости размера нанозерна от плотности теплового потока и вре-

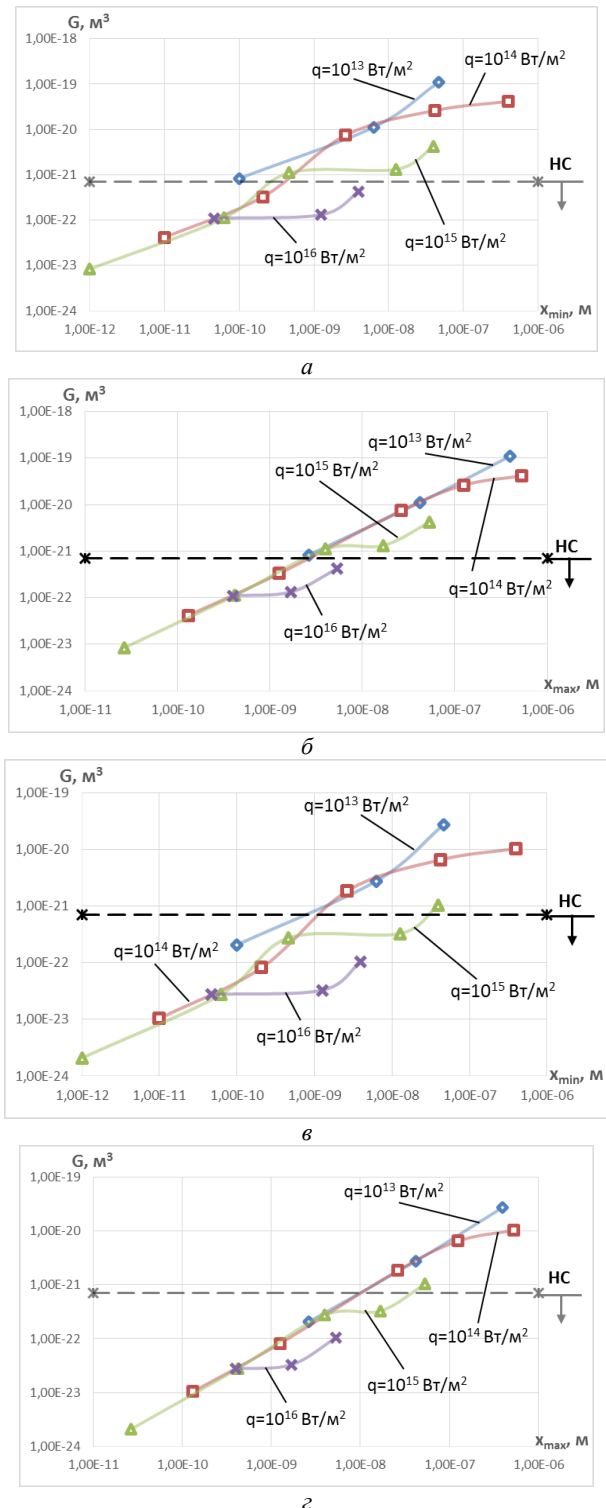
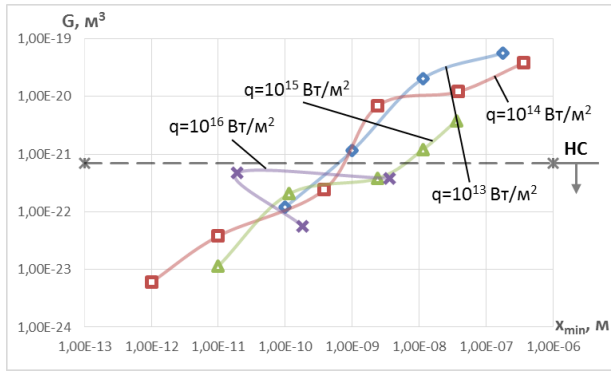


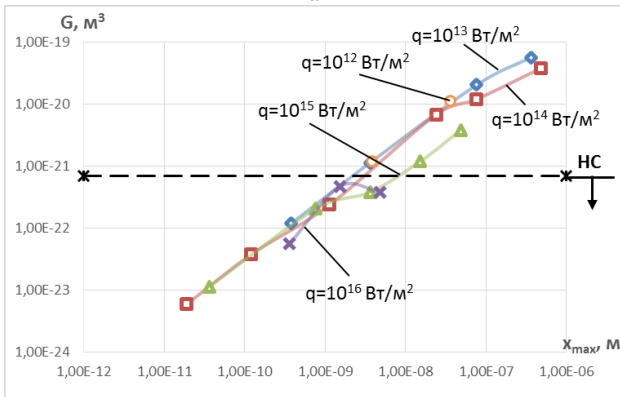
Рис. 11 – Зависимость объёма нанокластера от минимальной (а, в) и максимальной (б, г) глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (Т5К10) при  $R = 10^{-6}$  м (а, б) и  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м (в, г) для Т5К10

мени его действия для фемто- и пикосекундного лазера, которые показаны на рис. 13 - 15. Здесь также видно, что области технологических параметров, при которых реально возможно получение наноструктур,

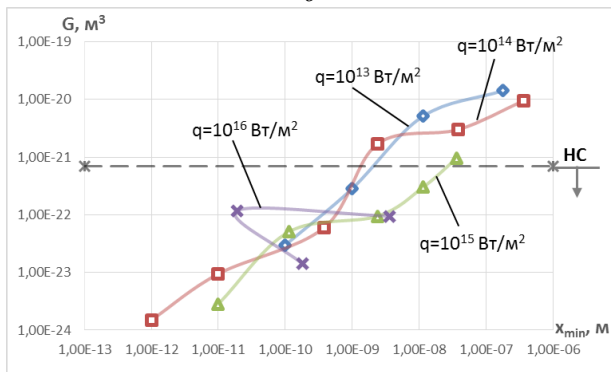
для ТТ20К9 значительно больше, чем для Т5К10 и тем более ВК4.



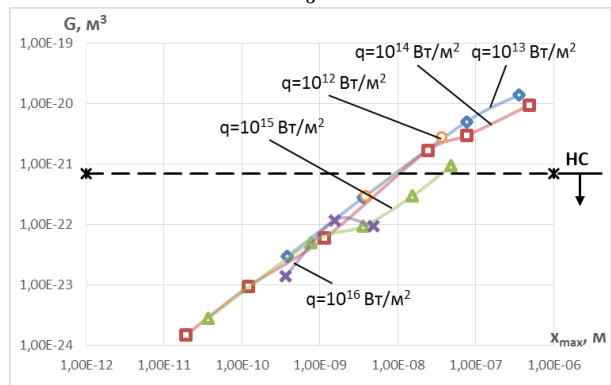
а



б

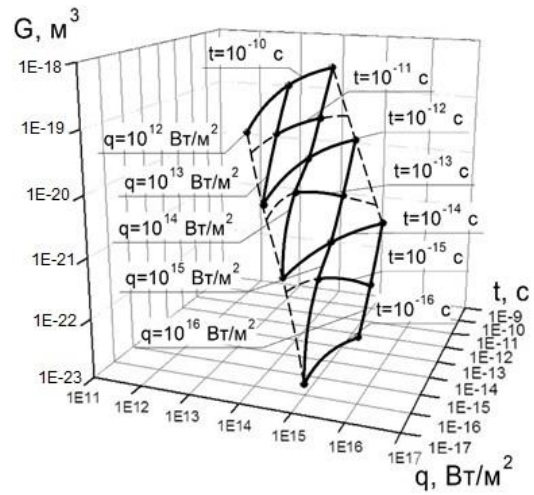


а

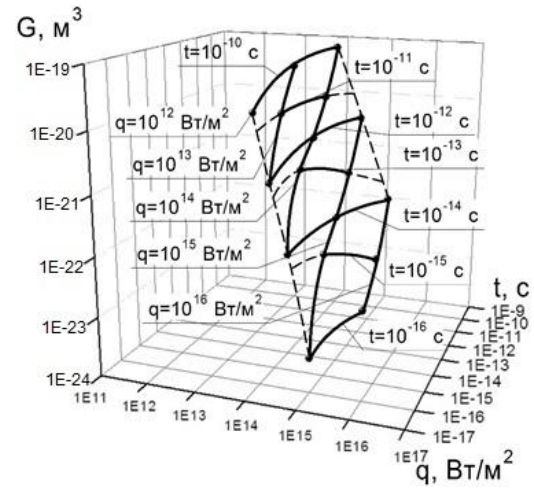


б

Рис. 12 – Зависимость объема нанокластера от минимальной (а, в) и максимальной (б, г) глубины при действии лазерного излучения с различной плотностью теплового потока q (ТТ20К9) при R = 10<sup>-6</sup> м (а, б) и R = 5 · 10<sup>-7</sup> м (в, г) для ТТ20К9

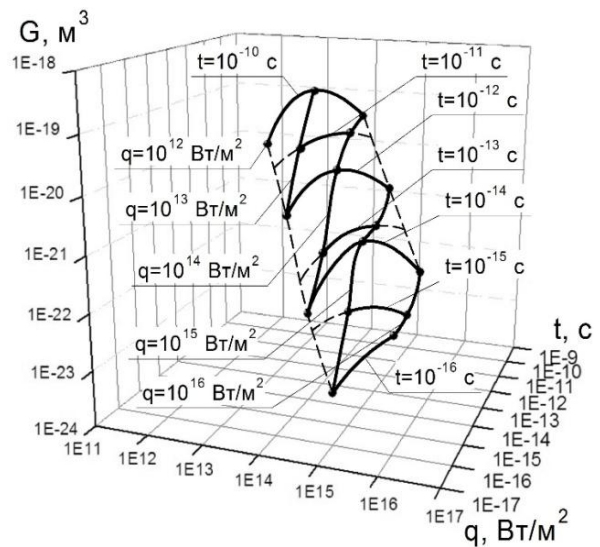


а



б

Рис. 13 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры при R = 10<sup>-6</sup> м (а) и R = 5 · 10<sup>-7</sup> м (б) для ВК4



а

Рис. 14 – Зависимость объема нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения q и времени его действия t в зоне, где образуются наноструктуры при R = 10<sup>-6</sup> м (а) и R = 5 · 10<sup>-7</sup> м (б) для Т5

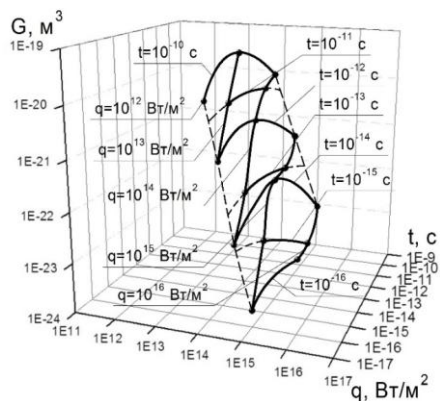


Рис. 14 – Окончание

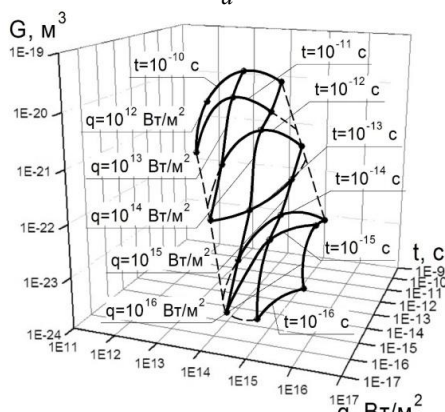
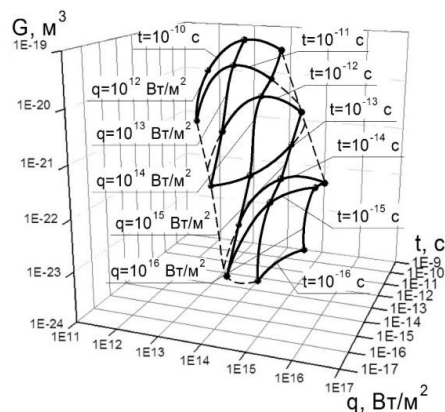


Рис. 15 – Зависимость объёма нанокластера от плотности теплового потока лазерного излучения  $q$  и времени его действия  $t$  в зоне, где образуются наноструктуры при  $R = 10^{-6}$  м (а) и  $R = 5 \cdot 10^{-7}$  м (б) для ТТ20К9

### Выводы.

Исследование особенностей образования наноструктур на одно-, двух- и трехкарбидных сплавах при действии лазерного излучения при действии фемто- и пикосекундного лазера показало:

1. Максимальные температуры в зоне облучения реализуются для трехкарбидного ТС ТТ20К9, а наименьшие – для однокарбидного ВК4.
2. Скорости роста температур во всех исследованных режимах превышают  $10^7$  К/с, что говорит о том, что этот критерий выполняется в исследованных режимах.
3. Величины температурных напряжений для режимов с  $q > 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup> могут ускорять процесс образо-

вания наноструктур, а для  $q > 10^{14} \dots 10^{16}$  Вт/м<sup>2</sup> есть реальная возможность получения наноструктур вследствие действия температурных напряжений.

4. Полученные объёмы наноструктур и глубины их залегания позволяют выбирать технологические параметры для получения наноструктур для исследования одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавов.

5. Полученные пространственные картины зависимости объёма наноструктур от плотности теплового потока и времени его действия позволяют проводить экспресс-оценку технологических параметров для получения наноструктур.

### Список литературы

1. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокрывтиями и наноструктурными модифицированными слоями: Моногр.-справ.: в 2 кн. / Г. И. Костюк – Х.: «Планета-Принт», 2016. – Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии. – 735 с.
2. Костюк Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. Костюк Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: моногр. / Г. И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн.1: Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. – 596 с.
5. Костюк Г. И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – Кн. 2: Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования. – 482 с.
6. Костюк Г. И. Наноструктуры и нанопокрывтия: перспективы и реальность: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
7. Костюк Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
8. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: моногр.-справ. / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
9. Костюк Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справ. / Г. И. Костюк. – К.: Вид-во АИНУ, 2003. – 412 с.
10. Костюк Г. И. Физико-технические основы роботизированного производства: учеб. пособие / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 614 с.
11. Гречихин Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – М.: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
12. Аксенов И. И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Х.: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
13. Гусев А. И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства / А. И. Гусев. – Екатеринбург: Изд-во РАН, Уральское отд-ние, 1998. – 302 с.
14. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
15. Решетняк, Е. Н. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий / Е. Н. Решетняк, А. И. Стрельницкий // Вопросы атомной науки и техники. – 2008. – № 2. – С. 119 – 130.
16. Андриевский Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 91, № 1. – С.50 – 56.
17. Состав, структура и свойства наноструктурных пленок боридов тантала / А. А. Гончаров, П. И. Игнатенко, В. В. Петухов и др. // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, вып. 10. – С. 82 – 87.

**Bibliography (transliterated)**

1. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, Planeta print, 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: vybor tekhnologicheskikh parametrov i ustanovok, proizvoditel'nost' obrabotki, fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki nanostruktur: monogr* [Nanotechnology: the choice of process parameters and settings, processing performance, physical and mechanical properties of nanostructures] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G. I. *Nanotekhnologii: teoriya, eksperiment, tekhnika, perspektivy: monogr* [Nanotechnology: theory, experiment, technology and prospects] – Kiev, Izd. tsentr Mezhdunar. akademii nauk i innovats. tekhnologiy, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 1: *Fizicheskiye protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and combined technologies]. 596 p.
5. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy naneseniya pokrytiy, ionnoy implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoy obrabotki i uprochneniya, kombinirovannykh tekhnologiy* [Physical-technical principles of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening and combined technologies] – Kiev, AINU, 2002. – Book 2: *Spravochnik dlya rascheta osnovnykh fizicheskikh i tekhnologicheskikh parametrov, otsenki vozmozhnostey, vybora tipa tekhnologiy i oborudovaniya* [Reference for calculation of the main physical and technological parameters, assessing opportunities, selecting the type of technologies and equipment]. 482 p.
6. Kostyuk, G. I. *Nanostruktury i nanopokrytiya: perspektivy i real'nost' ucheb.posobiye* [Nanostructures and nanocoating: Prospects and Reality] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2009. 406 p.
7. Kostyuk, G. I. *Nauchnyye osnovy sozdaniya sovremennykh*  
*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*
8. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiem i uprochnennym sloyem: monogr.-sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kharkiv, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2007. 633 p.
9. Kostyuk, G. I. *Effektivnyy rezhushchiy instrument s pokrytiem i uprochnennym sloyem: sprav* [Effective cutting tool coated with a layer of reinforced] – Kiev, AINU, 2003. 412 p.
10. Kostyuk, G. I. *Fiziko-tekhnicheskiye osnovy robotizirovannogo proizvodstva* [Physical and technical bases of robotized production] – Kharkov, Nats. aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», 2006. – 614 p.
11. Grechikhin, L. I. *Fizika nanochastits i nanote-khnologiy* [The physics of nanoparticles and nanotechnology] – Moscow, UP «Tekhnoprint», 2004. 397 p.
12. Aksenov, I. I. *Vakuumnaya duga v erozionnykh istochnikakh plazmy* [Vacuum arc erosion plasma sources] – Kharkiv, NII «KHFTI», 2005. 211 p.
13. Gusev, A. I. *Nanokristallicheskiye materialy: metody polucheniya i svoystva* [Nanocrystalline materials: methods and properties] – Ekaterinburg, Publishing House of the Russian Academy of Sciences, Ural Division, 1998. 302 p.
14. Gusev, A. I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology] – Moscow, Fizmatlit, 2005. 416 p.
15. Reshetnyak, E. N., Strel'nitskiy A. I. [Synthesis of hardening of nanostructured coatings] – [Problems of Atomic Science and Technology]. – 2008. – № 2. – p.p. 119 – 130.
16. Andriyevskiy, R. A. *Nanomaterialy: kontseptsiya i sovremennyye problemy* [Nanomaterials: concept and modern problems] *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2003. – Т. 91, № 1. – p.p. 50 – 56.
17. Goncharov A. A., Ignatenko P. I., Petukhov V. V. et al. *Sostav, struktura i svoystva nanostrukturnykh plenok boridov tantala* [The composition, structure and properties of nanostructured films of tantalum borides]. *ZhTF*. – 2006. – Т. 76, no. 10. – p.p. 82 – 87.

Поступила (received) 17.11.16

**Особливості утворення наноструктур на одно-, дво- і трьохкарбідних твердих сплавах при дії лазерного випромінювання / Г. І. Костюк, О. О. Бруяка, О. О. Воляк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 81–94. – Библиогр.: 17 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Особенности образования наноструктур на одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавах при действии лазерного излучения / Г. И. Костюк, О. О. Бруяка, Е. А. Воляк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 81–94. – Библиогр.: 17 назв. – ISSN 2079-004X.**

**The peculiarities of nanostructures on one-, two- and trehkarbidnyh solid alloys under laser radiation / G. I. Kostyuk, O. O. Bruyaka, Ye. A. Volyak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.81–94. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-004X**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Костюк Геннадій Ігорович** – доктор технічних наук, професор, професор Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Костюк Геннадий Игоревич** – доктор технических наук, профессор, профессор Национального аэрокосмического университета «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Kostyuk Gennadiy Igorevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Aerospace University Zhukovskiy, tel.: (057)-788-42-06, e-mail: g.kostyuk206@yandex.ru;

**Бруяка Ольга Олегівна** – к.т.н., доц., доц. Нац. авіац. ун-ту, м. Київ, тел.: (057)-788-42-06

**Бруяка Ольга Олеговна** – к.т.н., доц., доц. Нац. авіац. ун-та, г. Киев, тел.: (057)-788-42-06

**Bruiaka Olga Olehovna** – Candidate of Technical Sciences, assistant professor, National Aerospace University, Kiev, tel.: (057)-788-42-06;

**Воляк Елена Александрівна** – к. т. н, Нац. аерокосм. ун-ту «ХАІ», м. Харків, тел.: (057)-788-42-06;

**Воляк Елена Александровна** – к. т. н, Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», г. Харьков, тел.: (057)-788-42-06;

**Voliak Elena Aleksandrovna** – Candidate of Technical Sciences, National Aerospace University «KhAI», tel.: (057)-788-42-06

УДК 621.9-114

**В. О. ІВАНОВ, В. Є. КАРПУСЬ, І. М. ДЕГТЯРЬОВ****КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СВЕРДЛИЛЬНО-ФРЕЗЕРНО-РОЗТОЧУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

Забезпечення високої якості продукції неможливе без сучасного металорізального обладнання з ЧПК. У дослідженні розглянуто сучасний стан верстатобудівної галузі, зокрема здійснено статистичний аналіз виготовлення свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів у Японії, Тайвані, Німеччині. Проаналізовано які типи верстатів є найбільш затребуваними на машинобудівних виробництвах країн, що розглядаються. Виконано аналіз за 11 технічними характеристиками сучасних свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів вертикального та горизонтального компонувань світових виробників. Опираючись на результати проведеного аналізу, можна кількісно говорити про найбільш затребувані технічні характеристики обладнання для обробки різанням на сьогоднішній день.

**Ключові слова:** верстат, оброблювальний центр, компонування, продуктивність, точність, система ЧПК, обробка різанням.

Обеспечение высокого качества продукции невозможно без современного металлорежущего оборудования с ЧПУ. В исследовании рассмотрено современное состояние станкостроительной отрасли, в частности выполнено статистический анализ изготовления сверлильно-фрезерно-расточных станков в Японии, Тайване, Германии. Проанализировано, какие типы станков являются наиболее востребованными на машиностроительных предприятиях стран, что рассматриваются. Выполнен анализ по 11 техническим характеристикам современных сверлильно-фрезерно-расточных станков вертикальной и горизонтальной компоновок мировых производителей. Опираясь на результаты выполненного анализа, можно количественно говорить про наиболее востребованные технические характеристики оборудования для обработки резанием на сегодняшний день.

**Ключевые слова:** станок, обрабатывающий центр, компоновка, производительность, точность, система ЧПУ, обработка резанием.

It is impossible to ensure high-quality products without modern metal-cutting equipment with computer numerical control. The present research represents the current state of machine tool building industry; in particular, statistical analysis of drilling-milling-boring machine tools production in Japan, Taiwan and Germany has been carried out. The analysis has presented what types of machine tools are the most demanded in the machine-building manufacturing of the countries under consideration. According to 11 technical characteristics the analysis of drilling-milling-boring machine tools of vertical and horizontal configuration made by world manufacturers has been conducted. Based on the analysis's results we can speak about the most demanded technical characteristics of equipment for cutting today.

**Keywords:** machine tool, machining center, configuration, productivity, accuracy, CNC system, cutting.

**Вступ**

Багатоцільові верстати свердильно-фрезерно-розточувальної групи складають значну частку у парку металорізального обладнання. На них можлива комплексна послідовна обробка деталей різними інструментами з їх автоматичною заміною з інструментального магазину. У більшості випадків верстати оснащуються поворотними або глобусними столами, які дозволяють виконувати обробку складних деталей із кількох сторін при незмінному закріпленні. На таких верстатах, як правило, оброблюють плоскі та корпусні деталі, а також деталі складної форми. Аналіз обсягів виробництва металорізального обладнання та структури випуску верстатів за групами на прикладі провідних верстатобудівних країн (Японія, Тайвань, Німеччина) показав, що саме верстати свердильно-фрезерно-розточувальної групи превалюють у сучасному верстатобудуванні.

**1 Статистичний аналіз верстатобудування у провідних країнах світу****1.1 Аналіз японського верстатобудування**

Статистичні дані [1] свідчать, що кількість свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів, які виготовляються японською верстатобудівною галуззю, значно перевищують інші групи верстатів (табл. 1). У 2014 р. це значення досягло 60% (рис. 1). Частка токарних верстатів за останні 4 роки змінювалася у межах 19–27% від загальної кількості верстатів. Обсяг виготовлення інших груп верстатів майже не змінюється впродовж аналізованого періоду часу. Переважають оброблювальні центри, які становлять 95,4% від усіх верстатів свердильно-фрезерно-розточувальної групи (рис. 2). Детальний

аналіз показав, що у 2014 р. 91,3% оброблювальних центрів виготовлено з вертикальним компонуванням. Спостерігається тенденція до зменшення свердильних верстатів, темпи виготовлення яких за 3 роки зменшилися у 4,5 рази та у 2014 р. становлять лише 3,3% у загальному обсязі свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів. Кількість фрезерних верстатів збільшилася у 2 рази, але у кількісному співвідношенні це мізерні обсяги (табл. 2). Рівень автоматизації верстатів на дуже високому рівні, частка верстатів із ЧПК, які виготовлялися у період 2004–2014 рр., становить 83–90% від усього обсягу виготовлених верстатів у Японії [2]. У 2014 р. ця величина досягла 90,4%, що на 1,1% більше, ніж у попередньому році [1].

Кошти, отримані від експорту японських верстатів, розподілилися таким чином: 60,7% коштів від загальної суми експорту, отримані від країн азійсько-тихоокеанського регіону, 24,3% – американського регіону, 15% – європейського регіону. У структурі експорту частка свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів становить 51,9% від загальної кількості експортованих верстатів. У 2014 р. експортовано 64398 свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів, серед яких 81,6% – оброблювальні центри [1].

**1.2 Аналіз тайванського верстатобудування**

Найбільшим виробником та експортером продукції у Тайвані є верстатобудівна галузь. Загалом у Тайвані 1487 виробників обладнання, більшість із яких це малий та середній бізнес [3]. У розрізі світового верстатобудування Тайвань посідає 7 позицію з обсягом виробництва 4,03 млрд. дол. США [4].

© В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов, 2016

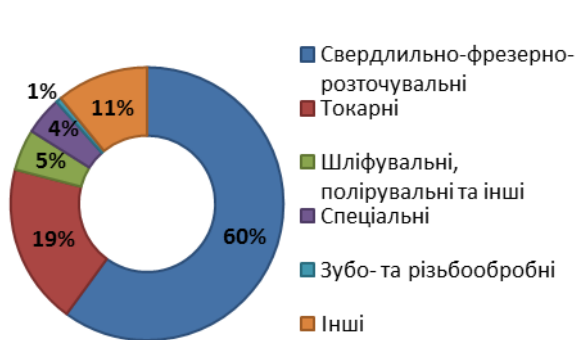


Рис. 1 – Розподіл верстатів, виготовлених у Японії у 2014 році, за групами верстатів

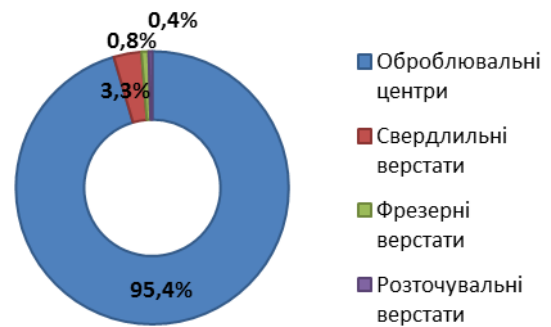


Рис. 2 – Розподіл верстатів, виготовлених у Японії у 2014 році, за типами верстатів свердильно-фрезерно-розточувальної групи

Таблиця 1 – Статистичні дані з виготовлення верстатів у Японії у 2011–2014 роках

Групи верстатів	Річний випуск верстатів, шт.			
	2011	2012	2013	2014
Свердильно-фрезерно-розточувальні	44815	54055	23310	59690
Токарні	18258	17940	15579	18890
Шліфувальні, полірувальні та інші	5474	6044	4515	4860
Спеціальні	3656	4543	3806	4481
Зубо- та різьбообробні	1009	942	596	664
Інші	12271	10125	8974	10822

Таблиця 2 – Статистичні дані з виготовлення свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів у Японії у 2011–2014 роках

Типи верстатів	Річний випуск верстатів, шт.			
	2011	2012	2013	2014
Оброблювальні центри	35329	45998	19229	56964
Свердильні верстати	8858	7321	3398	1969
Фрезерні верстати	256	447	438	500
Розточувальні верстати	372	289	245	257

Аналіз тайванського верстатобудування за період 2009–2012 рр. [5] показав стабільні дані щодо виготовлення свердильно-фрезерно-розточувального обладнання на рівні 15–19% у загальному обсязі виробництва металорізальних верстатів (рис. 3). Кількість токарних верстатів, що виготовляються, зменшилася на 16,6% порівняно з 2009 р. (табл. 3).

У 2012 р. виготовлено у 2,3 рази більше оброблювальних центрів, ніж у 2009 р., але майже на 19% менше, ніж у 2011 р. (табл. 4). У відсотковому співвідношенні їх частка становить 45% від загального обсягу виготовленого свердильно-фрезерно-розточувального обладнання (рис. 4). Частка свердильних верстатів майже не змінилася за період, що розглядається, але у кількісному співвідношенні збільшилося виготовлення верстатів майже у 1,7 рази. Виготовлення фрезерних верстатів зросло на 47% порівняно з 2009 р. Рівень автоматизації верстатів залишається низьким, тобто кількість універсального обладнання значно перевищує кількість автоматизованого. Лише невелика кількість свердильних верстатів оснащується системами ЧПК і цей показник варіюється у межах 11,2–26,7%, що відповідає періоду 2009–2012 рр. Частка фрезерних верстатів із ЧПК становить 9,4–21,4% за аналогічний період. Найбіль-

ші значення показників рівня автоматизації відповідають 2010 р.

Тайванське верстатобудування є експортно-орієнтованим, близько 80% металорізального обладнання експортується за кордон у 138 країн світу [6]. Найбільшими замовниками тайванських верстатів є Китай (35,3%) і США (12,6%) [5]. У 2015 р. до США експортовано 378,81 млн доларів США. За перше півріччя 2016 р. Тайвань експортував металорізальні верстати на суму 1,35 млрд. доларів США, що відповідає 13,4% загального експорту продукції машинобудування Тайваню [7]. Частка свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів від загальної кількості верстатів, що йдуть на експорт, складає 17%. Переважно це оброблювальні центри.

У 2012 р. для потреб внутрішнього ринку Тайвань імпортував 78637 металорізальних верстатів, переважно з Японії (близько 58,3%). Але частка свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів незначна – 4,5% від загальної кількості імпортованих верстатів [5].

За перше півріччя 2016 р. Тайвань імпортував металорізальні верстати на суму 357,354 млн доларів США, що на 1,8% менше за відповідний період 2015 р., та становить 2,9% від загального імпорту машинобудівної продукції до Тайваню [7].



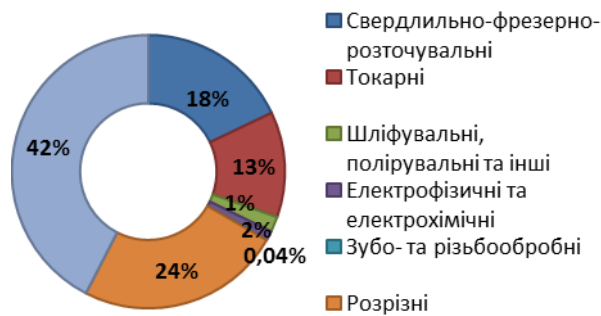


Рис. 3 – Розподіл верстатів, виготовлених у Тайвані у 2012 році, за групами верстатів

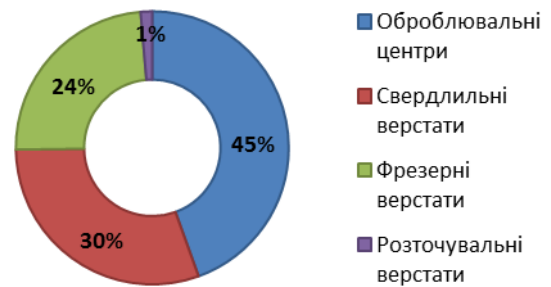


Рис. 4 – Розподіл верстатів, виготовлених у Тайвані у 2012 році, за типами верстатів свердильно-фрезерно-розточувальної групи

Таблиця 3 – Статистичні дані з виготовлення верстатів у Тайвані у 2009–2012 роках

Групи верстатів	Річний випуск верстатів, шт.			
	2009	2010	2011	2012
Свердильно-фрезерно-розточувальні	31115	55350	69084	57023
Токарні	47622	60670	38846	39722
Шліфувальні, полірувальні та інші	н/д	6327	6971	5787
Електрофізичні та електрохімічні	н/д	3760	3597	3492
Зубо- та різьбообробні	н/д	1007	203	130
Розрізні	н/д	71376	87653	77111
Інші	н/д	149252	158137	135092

Примітка: н/д – немає даних

Таблиця 4 – Статистичні дані з виготовлення свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів у Тайвані у 2009–2012 роках

Типи верстатів	Річний випуск верстатів, шт.			
	2009	2010	2011	2012
Оброблювальні центри	11077	21267	31420	25373
Свердильні верстати	10049	18755	18487	17278
Фрезерні верстати	9242	14640	18448	13587
Розточувальні верстати	747	688	729	785

За перше півріччя 2016 р. Тайвань імпортував металорізальні верстати на суму 357,354 млн доларів США, що на 1,8% менше за відповідний період 2015 р., та становить 2,9% від загального імпорту машинобудівної продукції до Тайваню [7].

### 1.3 Аналіз німецького верстатобудування

Верстатобудівна галузь є третьою у Німеччині за масштабом із обсягом виробництва близько 14 млрд. євро [8]. Відомо, що показники виготовлення обладнання за визначений період часу, у тому числі виражені у грошових одиницях, є одним із найбільш достовірних індикаторів стану справ у виробничих галузях національних економік. Аналіз німецького верстатобудування [9, 10], яке другий рік поспіль посідає другу позицію серед найбільших країн-виробників [4], показав, що у період 2006–2014 рр. також преважує випуск свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів (табл. 5).

У відсотковому співвідношенні протягом 2006–2014 рр. частки верстатів за групами залишаються майже незмінними. Так, частка свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів складає 38%, токарних – 20%, шліфувальних, полірувальних та інших – 15%, електрофізичних та електрохімічних – 7%,

зубо- та різьбообробних – 6%, розрізних – 3%, інших верстатів – 12% (рис. 5). 63% річного випуску свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів складають оброблювальні центри, що на 6% більше, ніж у 2006 р. Здебільшого це за рахунок зменшення обсягів виготовлення фрезерних верстатів (рис. 6). Частка випуску свердильних та розточувальних верстатів поступово збільшується, досягнувши у 2014 р. суму 232 млн. євро (табл. 6).

### 1.4 Аналіз інвестицій у нове металорізальне обладнання

Витрати коштів на обладнання – це запорука впевненого майбутнього машинобудівного виробництва, що дозволить підвищити ефективність та конкурентоздатність будь-якого підприємства. Опитування американських машинобудівних підприємств показало, що при оновленні верстатного парку 70% покупають нові верстати, 21% – ті, що були вжитку, 9% – відновлюють або модернізують існуюче обладнання. Модернізація верстата – це приблизно 30–40% вартості нового верстата такого ж призначення. Але збереження існуючих технологій не дозволяє оптимізувати виробничий процес виготовлення продукції, а ремонт верстатів буде відбуватися частіше.

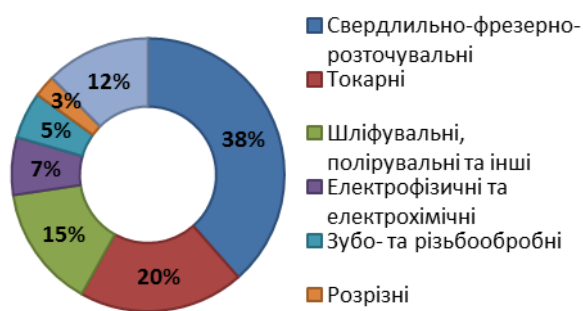


Рис. 5 – Розподіл верстатів, виготовлених у Німеччині у 2014 році, за групами верстатів

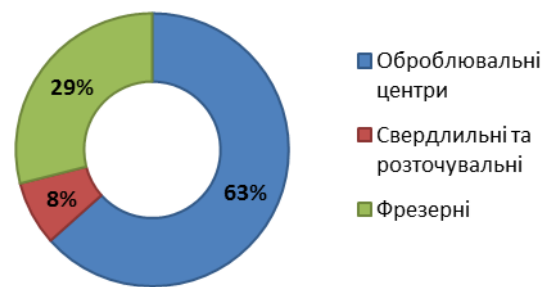


Рис. 6 – Розподіл верстатів, виготовлених у Німеччині у 2014 році, за типами верстатів свердильно-фрезерно-розточувальної групи

Таблиця 5 – Статистичні дані з виготовлення верстатів у Німеччині у 2006–2014 роках

Групи верстатів	Річний випуск верстатів, млн. євро								
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Свердильно-фрезерно-розточувальні	2320	2726	3214	2118	1911	2662	3123	3042	3045
Токарні	1112	1370	1565	1062	960	1491	1613	1542	1551
Шліфувальні, полірувальні та інші	973	1120	1226	853	710	1034	1180	1199	1150
Електрофізичні та електрохімічні	461	555	543	277	319	408	513	483	540
Зубо- та різьбообробні	457	543	748	619	528	575	581	529	437
Розрізні	205	238	268	145	149	202	202	194	206
Інші	469	536	650	566	517	632	796	952	983

Таблиця 6 – Статистичні дані з виготовлення свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів у Німеччині у 2006–2014 роках

Типи верстатів	Річний випуск верстатів, млн. євро								
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Оброблювальні центри	1310	1542	1913	1269	1081	1699	1961	1843	1931
Свердильні та розточувальні верстати	148	188	215	146	162	187	215	229	232
Фрезерні верстати	862	996	1086	703	668	776	947	970	882

Таблиця 7 – Статистичні дані зі споживання верстатів у США у 2010–2015 роках

Групи верстатів	Споживання верстатів, млн. дол. США					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Свердильно-фрезерно-розточувальні	1680,1	2694,7	2796,6	3065,6	3147	3226,1
Токарні	1150,8	2780,9	2993,1	1972,9	2097,6	3057,9
Шліфувальні, полірувальні та інші	131,8	254,3	458,8	391,3	455,6	697
Електрофізичні та електрохімічні	58,1	60,4	106,7	92,5	133,3	204,6
Інші	729,8	612,4	780,8	890,9	587,6	1369

До витрат, пов'язаних із придбанням верстата належить не лише вартість верстата, а й витрати на його доставку та монтаж, на придбання нової технологічної оснастки, на навчання виробничого персоналу. Слід враховувати, що на першому етапі будуть витрати часу на приведення верстата до рівня розрахункової продуктивності.

Спостерігається тенденція до збільшення капіталовкладень у придбання нового обладнання, причому витрати на свердильно-фрезерно-розточувальне обладнання складають близько 37,7% [11] від загального обсягу споживання верстатів у США (табл. 7). Під споживанням обладнання розуміємо сумарну вартість встановленого в країні обладнання – як власного, так і імпортованого. У 2016 р. за прогнозними даними [12]

6,217 млрд. дол. США буде витрачено американськими компаніями на придбання нового металорізного обладнання, що на 15% менше ніж у попередньому році. Зокрема, 2,658 млрд. дол. США, що майже 42,7%, це витрати на придбання свердильно-фрезерно-розточувального обладнання. Зберігається тенденція минулих років щодо капіталовкладень у придбання оброблювальних центрів горизонтального компонування з шириною робочого стола 400–800 мм та оброблювальних центрів вертикального компонування з шириною робочого стола більше 500 мм. Ці витрати перевищують минулорічні показники на 23% і 4% відповідно.

## 2 Статистичний аналіз свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів

Виконано статистичний аналіз технічних характеристик сучасних свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів вертикального та горизонтального компонувань як універсального, так і автоматизованого обладнання. Загалом проаналізовано більше 30 провідних виробників верстатів із Японії, Німеччини, США, Тайваню, Південної Кореї, Італії, Швейцарії та інших країн у обсязі 1075 верстатів, серед яких 817 верстатів вертикального та 258 верстатів горизонтального компонування.

Для виконання статистичного аналізу технічних характеристик металорізального обладнання розглядалися основні параметри, що характеризують технологічні можливості верстатів:

- розміри робочого стола верстата;
- розміри робочого простору верстата;
- максимальна частота обертання шпинделя;
- максимально допустиме рівномірно розподілене навантаження на стіл;
  - потужність верстата;
- точність позиціонування робочих органів верстата;
  - кількість різальних інструментів;
  - тип інструментального магазину;
  - час заміни різального інструменту;
    - кількість керованих осей;
    - система ЧПК.

Розглянемо детальніше кожний параметр.

### 2.1 Розміри робочого стола верстата

Габаритні розміри робочого стола верстата є однією з найважливіших характеристик, яка визначає граничні розміри деталей та верстатних пристроїв при механічній обробці. Аналіз робочої поверхні проводився за довжиною (рис. 7) та за шириною (рис. 8), попередньо виділивши певні діапазони розмірів. При виборі діапазонів керувалися загальноприйнятими розмірами стола для верстатів різних груп та класифікаціями розмірів деталей.

Більше 51% проаналізованих верстатів вертикального компонування мають ширину робочого стола в межах 250–630 мм та довжину до 1200 мм, та більше 50% верстатів горизонтального компонування – ширину

стола до 800 мм та довжину 800–2000 мм. Таким чином, дані діаграми показують, що виробники направлені на виготовлення верстатів, які забезпечують обробку негабаритних деталей, об'єднуючи при цьому компактність та універсальність, тобто охоплення максимально можливого об'єму оброблюваних деталей.

### 2.2 Розміри робочого простору верстата

Під цим параметром розуміємо простір верстата від поверхні робочого стола до торця шпинделя (для верстатів вертикального компонування) або до осі шпинделя (для верстатів горизонтального компонування). Для верстатів вертикального виконання даний параметр відіграє важливу роль та вказує на максимальні розміри заготовок, які можуть бути встановлені на верстаті. При цьому слід пам'ятати про розміри різального інструменту, який встановлюється у шпиндель верстата та установлювально-затискні елементи верстатного пристрою, які повинні прагнути до мінімальних значень за висотою.

Необхідно відмітити, що найбільш поширеними є моделі верстатів, де мінімальне значення відповідає 100–200 мм та до 100 мм, а максимальне значення – до 750 мм та до 1000 мм відповідно для верстатів вертикального (рис. 9) та горизонтального компонувань (рис. 10).

### 2.3 Максимальна частота обертання шпинделя

Відомо, що для важкооброблюваних, в'язких і високоміцних матеріалів потрібні шпиндельні вузли з високими крутними моментами при низьких частотах обертання, а для більш м'яких матеріалів – високошвидкісні. Однак, для багатомономенклатурного виробництва, де впродовж робочої зміни виконується обробка деталей із різних матеріалів, потрібен компроміс між крутним моментом та потужністю привода.

Аналізуючи діаграму, помітно, що приблизно 50% верстатів вертикального компонування мають максимальну частоту обертання шпинделя від 5000 об/хв. до 10000 об/хв. (рис. 11 а).

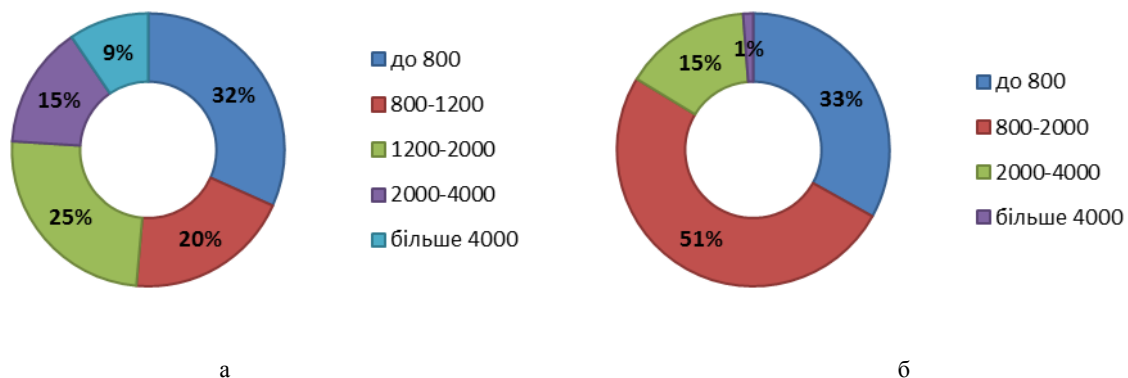


Рис. 7 – Розподіл верстатів за довжиною робочого столу, мм:  
а – верстати вертикального компонування; б – верстати горизонтального компонування

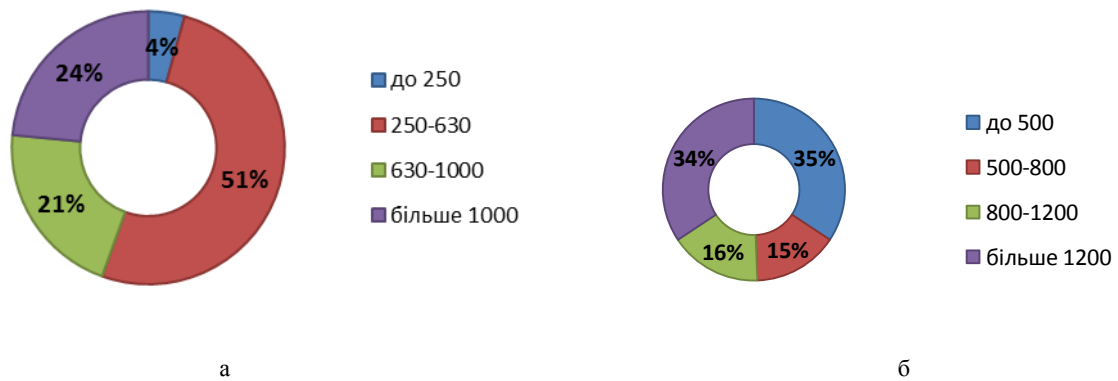


Рис. 8 – Розподіл верстатів за шириною робочого столу, мм:  
а – верстати вертикального компоунвання; б – верстати горизонтального компоунвання

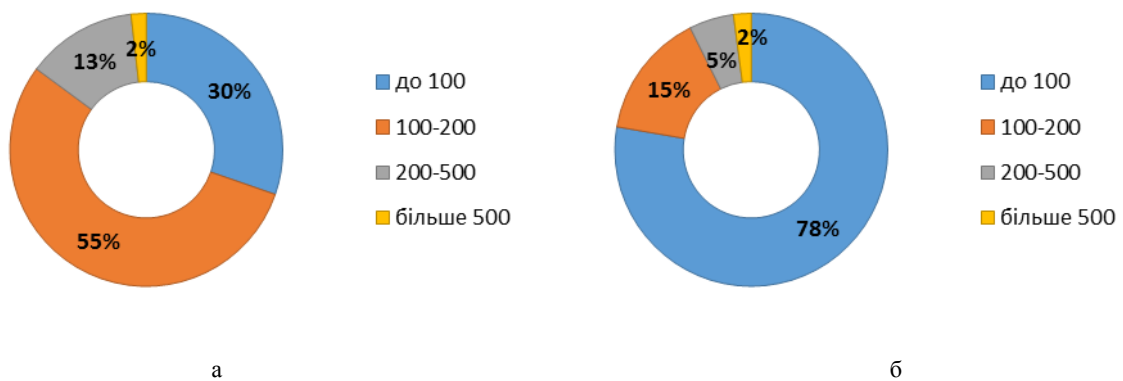


Рис. 9 – Розподіл верстатів за мінімальною відстанню від шпинделя до поверхні робочого столу, мм:  
а – верстати вертикального компоунвання; б – верстати горизонтального компоунвання

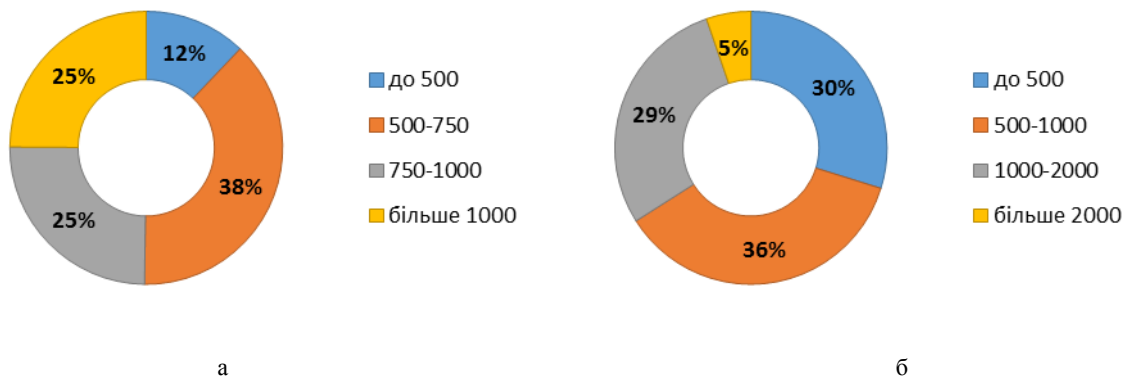


Рис. 10 – Розподіл верстатів за максимальною відстанню від шпинделя до поверхні робочого столу, мм:  
а – верстати вертикального компоунвання; б – верстати горизонтального компоунвання

Розглянутий критерій із точки зору продуктивності характеризує можливість зниження витрат часу при застосуванні оптимальних режимів різання, які підтримуються технічними характеристиками верста. У сучасних методах виготовлення поширення набув метод обробки деталей із використанням різального інструменту для високих подач, при цьому потрібно забезпечувати надвисоку частоту обертання різального інструменту. Тому необхідно відмітити тенденцію підвищення максимально можливих обертів, що наочно відображено на діаграмі: 22% вер-

статів відповідає частоті обертання шпинделя 10000–18000 об/хв. Наявність шпинделів із максимальною частотою обертання шпинделя до 5000 об/хв., яка складає 23% свідчить, що виробники ще не повністю відійшли від використання низькооберткових двигунів і ще існує потреба у їх використанні. Наявність такого обладнання в асортименті верстатобудівників можна пояснити потребою підприємств малого та середнього бізнесу, для яких великі капіталовкладення є досить проблематичними.

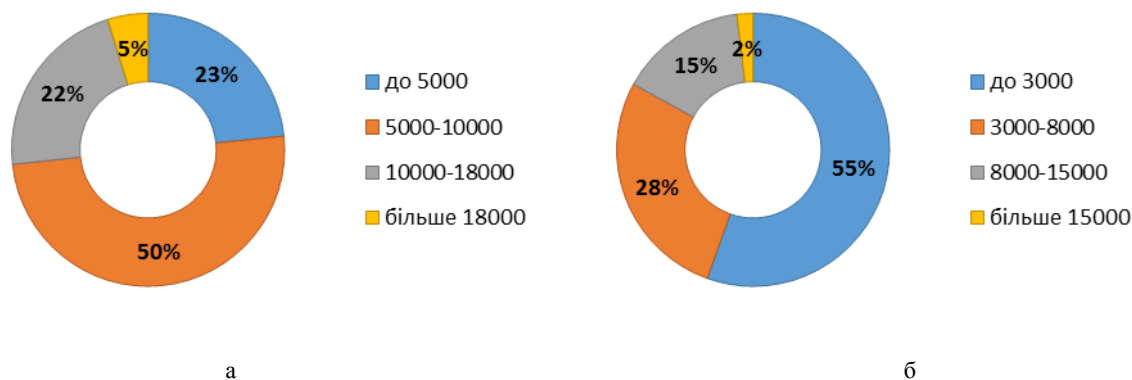


Рис. 11 – Розподіл верстатів за максимальною частотою обертання шпинделя, об/хв.:  
а – верстати вертикального компоунвання; б – верстати горизонтального компоунвання

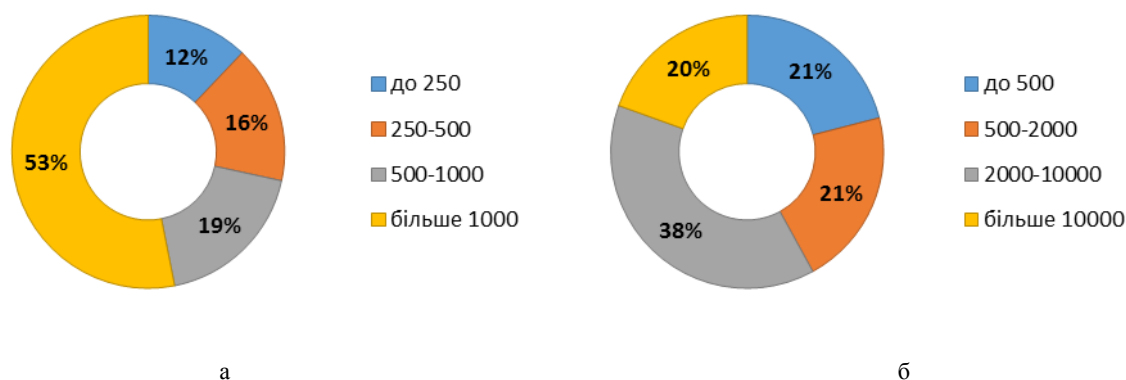


Рис. 12 – Розподіл верстатів за максимально допустимим навантаженням на стіл, кг:  
а – верстати вертикального компоунвання; б – верстати горизонтального компоунвання

Для невеликих приватних підприємств превалює не час обробки, а вартість верстата. Збільшення частоти обертання більше 2000 об/хв. призводить до зростання вартості верстата майже на порядок. Верстати горизонтального компоунвання мають дещо інші конструктивні особливості, а тенденція співвідношення їх виготовлення відображена на діаграмі (рис. 11 б): близько 83% верстатів горизонтального компоунвання забезпечують до 8000 об/хв. Така відмінність від верстатів вертикального компоунвання пояснюється специфікою деталей, що оброблюються на них. В основному це великогабаритні корпусні деталі зі значними конструктивними елементами (основні отвори великого діаметру, площини), обробка яких на швидкостях різання, що дозволяють можливості різального інструменту відбувається при меншій частоті обертання. Габаритні заготовки також не можна оброблювати на надвисоких частотах обертання з міркувань безпеки, адже входження в зону резонансу при обробці таких заготовок може призвести до виникнення аварійної ситуації на робочому місці.

#### 2.4 Максимально допустиме рівномірне розподілене навантаження на стіл

Ця характеристика має безпосередній зв'язок із конструкцією верстату, верстатним пристроєм і вагою деталей. Тому аналіз виконувався виходячи з середньостатистичної ваги деталей, результати якого

представлені на рис. 12. Вага верстатного пристрою повинна прямувати до мінімального значення при збереженні достатньої жорсткості, це дозволить при незмінному максимально-допустимому навантаженні встановлювати важчі заготовки, тобто ефективніше використовувати можливості верстата. Чим більше значення, тим більш важкі заготовки можна обробити, більш інтенсивні параметри обробки можна застосувати, а отже, кращі динамічні властивості технологічної системи «верстат – верстатний пристрій – різальний інструмент – заготовка».

#### 2.5 Потужність верстата

Особливістю сучасних багатоцільових верстатів свердильно-фрезерно-розточувальної групи є високошвидкісна обробка з частотою обертання шпинделя в межах 20–40 тис. об/хв. Найвищий рівень частот досягається за допомогою мотор-шпинделів без механізмів коробки швидкостей. Конструкція приводів головного руху сучасних багатоцільових верстатів поряд із високими частотами обертання забезпечує високу вібростійкість, а отже, якість та продуктивність обробки [13]. Сучасні інструменти дозволяють знімати досить великі припуски та працювати в важких умовах, тому і верстати для забезпечення максимальної ефективності використання різального інструменту повинні бути достатньо потужними та мати як високу частоту обертання, так і достатній крутний момент.

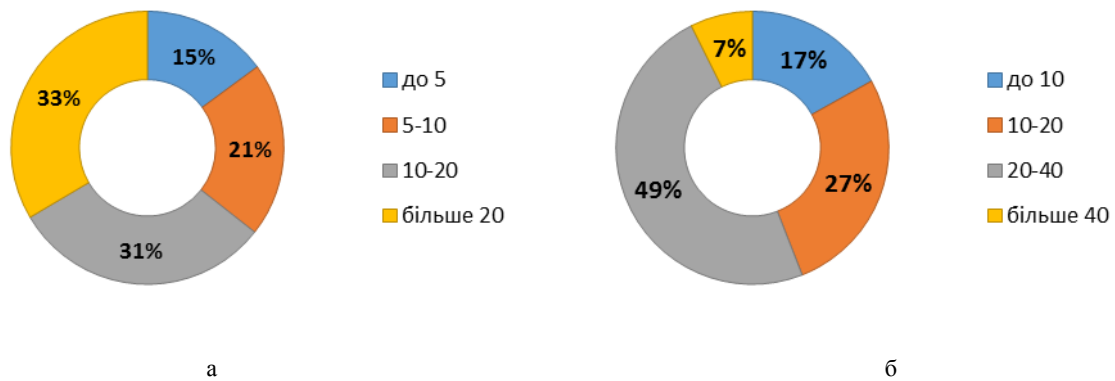


Рис. 13 – Розподіл верстатів за потужністю, кВт:

а – верстати вертикального компоновання; б – верстати горизонтального компоновання

Верстати вертикального виконання з потужністю головного шпинделя до 20 кВт займають 67% всього переліку, причому верстати з потужністю 10–20 кВт досягають 31% (рис. 13 а). 76% верстатів горизонтального компоновання мають потужність у межах 10–40 кВт, що притаманно верстатам даної конструкції, оскільки вони призначенні переважно для важкої обробки деталей (рис. 13 б).

### 2.6 Точність позиціонування

Цей параметр є узагальненою величиною, яка вказує на точність переміщення робочих елементів верстата, яка залежить від повторюваності положень після переміщень, але включає в себе не лише величину діапазону помилки позиціонування, але й її середнє значення, тобто є більш універсальною характеристикою. Точність позиціонування вказує наскільки велика може бути помилка позиціонування за певною віссю системи координат верстата.

Конструкції деталей постійно ускладнюються, підвищуються вимоги до точності розмірів, форми та взаємного розташування, що безпосередньо впливають на якість деталей та виробу в цілому. Точність розмірів при обробці немірним інструментом і точність взаємного розташування залежать від точності позиціонування, тобто сучасні верстати повинні бути адаптовані для нових підвищених вимог і задовольняти їх у повному обсязі. Точність позиціонування робочих органів верстата залежить від великої кількості факторів, в числі основних – люфти напрямних і передач, неспіввісність напрямних осей і їх неперпендикулярність. Враховуючи суттєві недоліки приводів подачі із використанням кульково-гвинтових пар, у даний час поширення набули лінійні двигуни. Їх прототипом є найпростіша електромагнітна система, що складається з металевого осердя – магніту та статорної обвитки. При подачі струму певної полярності до обвитки осердя зміщується в той чи інший бік. Дані двигуни дозволяють виконувати переміщення робочих органів верстата з точністю до 0,1 мкм. Аналізуючи точність позиціонування, можна відмітити, що діапазон величин варіюється у широкому діапазоні від 0,0001 до 0,1 мм.

### 2.7 Кількість інструментів

Для комплексної обробки кількох поверхонь деталі необхідно використовувати декілька різних ін-

струментів. Із усього різноманіття корпусних деталей середніх розмірів, які доцільно обробляти на металорізальних верстатах, у середньому приблизно 18% вимагають застосування не більше 10 інструментів, 50% – до 20, 17% – до 30, 10% – 40 і 5% – до 50 інструментів [14]. Для механічної обробки деталей складної форми застосовуються інструментальні магазини з кількістю до 100 інструментів і більше. Виконаний аналіз верстатів за місткістю інструментальних магазинів показав, що 26% верстатів вертикального компоновання та лише 2% верстатів горизонтального компоновання містять до 20 різальних інструментів (рис. 14). Таку невелику поширеність інструментальних магазинів місткістю до 20 інструментів у верстатів горизонтального компоновання можна пояснити тим, що на верстатах даного типу, як правило, обробляються великогабаритні деталі з великою кількістю поверхонь різних типорозмірів, що потребує більшої кількості інструментів. Також габаритні розміри верстатів горизонтального компоновання більші, ніж верстатів вертикального компоновання, що дозволяє розміщувати інструментальні магазини більшої місткості. Результати аналізу свідчать, що 20–40 різальних інструментів є найбільш поширеною практикою для верстатів як вертикального (67%), так і горизонтального (73%) компоновань. Формування переліку різальних інструментів в інструментальному магазині верстата залежить від конструктивно-технологічних особливостей обробки деталей, а також з урахуванням інструментів-дублерів із метою підвищення надійності обробки різанням.

### 2.8 Тип інструментального магазину

Серед усього переліку відібраного обладнання, найчастіше використовуються наступні магазини: ланцюгового, барабанного, зонтичного та дискового типів.

Дискові магазини служать для накопичення порівняно невеликого числа інструментів, як правило, до 30 шт. Барабанні магазини відрізняються від дискових лише конструкцією та способом розміщення інструментів. Одним із різновидів магазинів барабанного типу є зонтичний магазин, який відрізняється лише вертикальним розташуванням, дозволяючи виконувати заміну інструменту за найкоротшим шляхом.

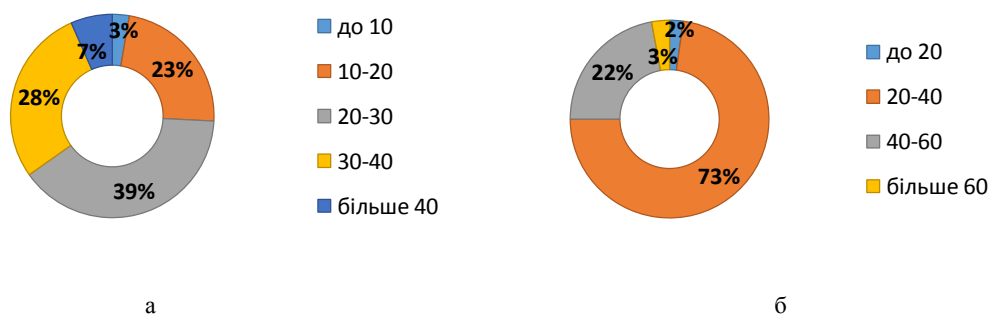


Рис. 14 – Класифікація верстатів за кількістю інструментів, шт.: а – верстати вертикального компоновання; б – верстати горизонтального компоновання

Магазини з кількістю різальних інструментів більше 40–60 шт. доцільно виконувати ланцюгового типу.

Незалежно від типу магазину та пристрою, реалізуючого його автоматичну заміну, різальні інструменти встановлюють у шпиндель верстата або в гніздо магазину за допомогою стандартних інструментальних оправок, а налагодження різального інструменту на заданий розмір, як правило, здійснюється поза верстатом.

### 2.9 Час заміни різального інструменту

Одним із параметрів, який характеризує продуктивність верстата, є час заміни інструменту. Існує два різновиди даної величини: «від стружки до стружки» (час заміни інструменту від обробки до наступної обробки) та «від інструменту до інструменту» (час безпосередньої заміни одного інструменту на інший у шпинделі верстата). Серед аналізованого діапазону верстатів час заміни від інструменту до інструменту коливається в межах 0,3–9,5 с, час заміни від стружки до стружки – від 1,5 до 20 с. Даний час залежить безпосередньо від місткості інструментального магазину та способу автоматичної заміни різального інструменту.

### 2.10 Кількість керованих осей

Даний параметр дуже важливий із точки зору розгляду характеристик металорізальних верстатів та може коливатися від однієї осі (вертикально-свердильний верстат) до п'яти (оброблювальні центри). З усього різноманіття групи проаналізованих верстатів 613 із них мають до 3-х осей та 204 верстати мають 4-и та 5-ть осей, що становить 75% і 25% відповідно. Такий аналіз хоча і примітивний, але говорить про те, що універсальність, як і раніше, займає перше місце при обробці деталей. Можливо це ре-

зультат високої вартості верстатів із здатністю 5-и осьової обробки поверхонь деталей. Відомо, що вартість 5-и координатних оброблюваних центрів значно вища, а їх окупність буде досягнута лише за умови постійних замовлень на виготовлення деталей. При розрахунках продуктивності багатоцільових верстатів їх ефективність очевидна, що забезпечується економією часу та підвищенням точності обробки через відсутність переустановлень. При цьому реалізується обробка поверхонь, яка не доступна на 3-и координатних верстатах. Ще одним фактором є час програмування, при переведенні якого у фінанси, враховуючи заробітну платню операторів, програмістів, експлуатаційні витрати тощо, можна оцінити економічну ефективність переходу на 5-и координатну обробку деталей.

### 2.11 Система ЧПК

Сучасні системи ЧПК полегшують підготовку та налагодження керуючих програм, які можуть бути складені та відредаговані безпосередньо на верстаті у режимі діалогу. Системи легко адаптуються до найскладніших багатоцільових верстатів і дозволяють виконувати високопродуктивну обробку. Серед розглянутого переліку аналізованого обладнання найпоширенішими є системи ЧПК: Fanuc (Японія), Siemens (Німеччина), Heidenhain (Німеччина), Haas (США), Mitsubishi Electric (Японія).

### 2.12 Найбільш поширені параметри верстатів

Опираючись на результати проведеного аналізу, можна кількісно говорити про найбільш затребувані технічні характеристики обладнання для обробки різанням на сьогоднішній день (табл. 8).

Таблиця 8 – Найбільш поширені параметри верстатів

Технічна характеристика	Верстати вертикального компоновання	Верстати горизонтального компоновання
Габаритні розміри робочого столу верстата (довжина x ширина), мм	1200x630	2000x800
Розміри робочого простору верстата (відстань від поверхні робочого столу до шпинделя)		
– мінімальна, мм	200	100
– максимальна, мм	750	1000
Максимальна частота обертання шпинделя, об/хв	10000	8000
Максимально допустиме рівномірно розподілене навантаження на стіл, кг	1000	10000
Потужність верстата, кВт	10	20
Кількість інструментів, шт.	30	40
Точність позиціонування робочих органів верстата, мм	0,001	0,001
Кількість керованих осей	4 та 5	4 та 5

**Висновки**

У сучасному машинобудуванні існує протиріччя між необхідністю скорочення витрат часу на підготовку виробництва та ускладненням конструкції виробів. Сьогодні суспільство потребує більше різновидів продукції, а, отже, обладнання та процеси мають бути більш гнучкими, щоб забезпечити потреби ринку та скоротити час випуску готової продукції. Це обумовлює інженерів розробляти та впроваджувати принципово нові конструкторсько-технологічні рішення з метою інтенсифікації та автоматизації виробництва. Аналіз технологічних можливостей та технічних характеристик металообробного обладнання показав, що тенденцією у верстатобудівній галузі є прагнення до комплексної обробки деталей на оброблювальних центрах із ЧПК, що дозволяє скоротити витрати часу та кількість засобів технологічного оснащення, а також підвищити продуктивність виготовлення деталей у результаті підвищення рівня концентрації технологічних операцій. Ефективне застосування багатоцільових оброблювальних центрів із ЧПК пов'язане з використанням гнучких верстатних пристроїв, які забезпечують необхідні схеми базування заготовок, високий ступінь гнучкості, механізоване або автоматизоване переналагодження установлювально-затискних елементів, високу жорсткість конструкції, інструментальну доступність, можливість спільної роботи з промисловими роботами.

**Список літератури**

1. Machine Tool Industry Japan 2015 / Japan Machine Tool Builders' Association. – 2015. – 40 p.
2. Machine Tool Industry Japan 2014 / Japan Machine Tool Builders' Association. – 2014. – 15 p.
3. Machinery Industry in Taiwan / Switzerland Global Enterprise. – 2013. – 45 p.
4. 2016 World Machine-Tool Output & Consumption Survey / Gardner Research. – 2016. – 12 p.
5. Production of Taiwan Machine Tools in 2010–2012 by Products [Електронний ресурс] // Taiwan Association of Machinery Industry. – 2013. – Режим доступу: <http://www.tami.org/st/week2.htm>.
6. Wright I. 3 Surprising Facts About Taiwan's Machine Tool Industry [Електронний ресурс] / Ian Wright // ENGINEERING.com. – 2016. – Режим доступу: <http://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13175/3-Surprising-Facts-About-Taiwans-Machine-Tool-Industry.aspx>.
7. Statistics of Taiwan General Machinery in 2016 (Jan~June) [Електронний ресурс] // Taiwan Association of Machinery Industry. – 2016. – Режим доступу: [http://www.tami.org/st/taiwan\\_ind\\_201606.pdf](http://www.tami.org/st/taiwan_ind_201606.pdf).
8. The Machinery & Equipment Industry in Germany. Industry Overview / Germany Trade & Invest. – Issue 2015/2016. – 2015. – 16 p.

9. The German Machine Tool Industry / German Machine Tool Builders' Association. – 2014. – 88 p.
10. VDW Market Report 2014 / German Machine Tool Builders' Association. – 2015. – 88 p.
11. Kline S. U.S. Investment in Machine Tools Poised to Reach Remarkable Level [Електронний ресурс] / Steve Kline // Modern Machine Shop. – 2015. – Режим доступу: <http://www.mmsonline.com/articles/can-you-believe-it>
12. 2016 Capital Spending Survey. Machine Tools Executive Summary / Gardner Research, 2015. – 8 p.
13. Карпуть В. Є. Ефективне використання верстатів з ЧПК у авіаційному агрегатобудуванні / В. Є. Карпуть, В. О. Граніця. — Х. : ДП ХМЗ «ФЕД», 2009. – 228 с.
14. Карпуть В. Е. Современные требования к технологической оснастке станков с ЧПУ / В. Е. Карпуть, В. А. Иванов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – № 22. – С. 23–35.

**References (transliterated)**

1. Machine Tool Industry Japan 2015 / Japan Machine Tool Builders' Association. – 2015. – 40 p.
2. Machine Tool Industry Japan 2014 / Japan Machine Tool Builders' Association. – 2014. – 15 p.
3. Machinery Industry in Taiwan / Switzerland Global Enterprise. – 2013. – 45 p.
4. 2016 World Machine-Tool Output & Consumption Survey / Gardner Research. – 2016. – 12 p.
5. Production of Taiwan Machine Tools in 2010–2012 by Products // Taiwan Association of Machinery Industry. – 2013. – Available at: <http://www.tami.org/st/week2.htm>.
6. Wright I. 3 Surprising Facts About Taiwan's Machine Tool Industry / Ian Wright // ENGINEERING.com. – 2016. – Available at: <http://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/13175/3-Surprising-Facts-About-Taiwans-Machine-Tool-Industry.aspx>.
7. Statistics of Taiwan General Machinery in 2016 (Jan~June) // Taiwan Association of Machinery Industry. – 2016. – Available at: [http://www.tami.org/st/taiwan\\_ind\\_201606.pdf](http://www.tami.org/st/taiwan_ind_201606.pdf).
8. The Machinery & Equipment Industry in Germany. Industry Overview / Germany Trade & Invest. – Issue 2015/2016. – 2015. – 16 p.
9. The German Machine Tool Industry / German Machine Tool Builders' Association. – 2014. – 88 p.
10. VDW Market Report 2014 / German Machine Tool Builders' Association. – 2015. – 88 p.
11. Kline S. U.S. Investment in Machine Tools Poised to Reach Remarkable Level / Steve Kline // Modern Machine Shop. – 2015. – Available at: <http://www.mmsonline.com/articles/can-you-believe-it>
12. 2016 Capital Spending Survey. Machine Tools Executive Summary / Gardner Research, 2015. – 8 p.
13. Karpus V. E., Granycya V. O. Efektivne vikoristannya verstativ z ChPK u aviatsiynomu agregatobuduvanni [Effective application of CNC machine tools in aircraft modular machine constructing]. Kharkiv, FED, 2009. 228 p.
14. Karpus V.E., Ivanov V.A. Sovremennyye trebovaniya k tehnologicheskoy osnastke stankov s ChPU [Modern requirements to tooling for CNC machine tools]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008, no. 22, pp. 23–35.

Поступила (received) 17.11.2016

**Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions**

**Конструкторсько-технологічний аналіз сучасних свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів / В. О. Іванов, В. Є. Карпуть, І. М. Дегтярьов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 95–105. – Библиогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Конструкторско-технологический анализ современных сверлильно-фрезерно-расточных станков / В. А. Иванов, В. Е. Карпуть, И. М. Дегтярев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 95–105. – Библиогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.**



**Design and manufacturing analysis of modern drilling-milling-boring machine tools / V. O. Ivanov, V. E. Karpus, I. M. Dehtiarov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.95–105. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-004X.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Іванов Віталій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету, м. Суми; тел.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua.

**Іванов Лев Вадимович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машиностроєння, станків та інструментів Сумського державного університету, г. Суми; тел.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua.

**Ivanov Vitalii Oleksandrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Associate Professor of Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools of Sumy State University, Sumy; tel.: (0542) 33-10-24; e-mail: ivanov@tmvi.sumdu.edu.ua.

**Карпуть Владислав Євгенович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків.

**Карпуть Владислав Євгеньевич** – доктор технічних наук, професор кафедри інженерної механіки, Національної академії Національної гвардії України, г. Харків.

**Karpus Vladyslav Evhenovych** – Doctor of technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering of National Academy of National Guard of Ukraine, Kharkiv.

**Дегтярьов Іван Михайлович** – аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету, м. Суми.

**Дегтярев Иван Михайлович** – аспірант кафедри технології машиностроєння, станків та інструментів Сумського державного університету.

**Dehtiarov Ivan Myhailovych** – PhD student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools of Sumy State University, Sumy.

УДК 621.95

Г.Л. ХАВИН

## ИЗНАШИВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА И КРИТЕРИИ ЗАТУПЛЕНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ КОМПОЗИТОВ

Надано аналіз процесу зношування і формулювання критерію затуплення для свердел з конфігурацією відмінною від традиційного спірального свердла. Розглянуто вплив технологічних факторів, марки і типу переплетення композиту, об'ємного вмісту наповнювача на інтенсивність зношування і розшарування в отворах під час свердління багатослойних композиційних матеріалів. Представлено аналіз експериментальних і теоретичних досліджень якості роботи спеціальних свердел. Проаналізовано вплив різних технологічних факторів на зменшення величини дефектів.

**Ключові слова:** критерій затуплення, зношування спеціальних свердел, дефекти свердління.

Представлен анализ процесса изнашивания и формулировка критерия затупления для сверл с конфигурацией отличной от традиционного спирального сверла. Рассмотрено влияние технологических факторов, марки и типа переплетения композита, объемного содержания наполнителя на интенсивность изнашивания и расслоение в отверстиях при сверлении многослойных композиционных материалов. Представлен анализ экспериментальных и теоретических исследований качества работы специальных сверл. Проанализировано влияние различных технологических факторов на уменьшение величины дефектов.

**Ключевые слова:** затупления, изнашивание специальных сверл, дефекты сверления.

The analysis of the wear process and the formulation of criteria for tool dulling's for drills with a configuration different from the conventional spiral drill is presented. The influence of process factors, and the composite mark and his weave type, the volume content of the filler on the wear and delamination in the holes for drilling multilayer composite materials are considered. The analysis of experimental and theoretical studies of the quality of special drills operation is presented. So, affecting of different process factors on the reduction in the amount of defects is analyzed.

**Keywords:** dulling tools criterion, special drills wear, drilling defects.

**Введение.** В большинстве приложений главным требованием к сверлению отверстий в композитах является его высокое качество. Большинство отверстий в композитах — это крепежные отверстия под заклепки или болтовые соединения различной степени точности. Во многих случаях качество этих соединений определяет прочность или усталостную прочность всего изделия в целом. Поэтому операция сверления композитов должна сопровождаться минимальным появлением различных дефектов с минимальной величиной и безопасной ориентацией.

Интенсивность воздействия различных композитов и влияние армирования на износ инструмента изучены достаточно мало. Имеются частные экспериментальные исследования, которые пока не позволяют сделать какие-либо однозначные выводы и получить обобщающие закономерности. Из природы свойств наполнителя и связующего можно предположить, что влияние физико-механических характеристик наполнителя на изнашивание инструмента, будет более значительным, чем связующего. Поэтому в исследованиях по этому вопросу уделяется больше внимания влиянию армирования и количества наполнителя на интенсивность износа, чем связующего.

**Анализ последних исследований и литературы.** Считается, что воздействие композита на материал сверла подобно действию шлифовального круга. В результате имеет место один из классических случаев абразивного износа в виде царапания. Интенсивность этого воздействия зависит от материала наполнителя и его процентного содержания. Кроме того, вид армирования композита может привести к большей интенсификации изнашивания инструмента, чем даже тип наполнителя.

В [1] приведены данные, характеризующие интенсивность износа сверл при обработке различных типов стеклопластиков. Сравнивалась интенсивность

величины износа сверл по задней грани заборного конуса при постоянном значении стойкости (износ при обработке стеклотекстолита СТЭФ принимался за единицу).

Таблица 1 – Сравнительная интенсивность воздействия стеклопластиков на материал инструмента

P18			BK8		
СТЭФ	АГ- 4С	СВАМ	СТЭФ	АГ- 4С	СВАМ
1	0,65	0,85	1	1,35	1,30

Данные в табл.1 не являются характеристикой их относительной истирающей способности, так как интенсивность затупления инструмента является результатом совместного воздействия истирающей способности и температуры в зоне резания.

Характерные зависимости влияния количества наполнителя на износ инструмента получены в [2], где исследовалось влияние количества просверленных отверстий и количества наполнителя на износ сверл и качество просверленных отверстий. Было изучен процесс сверления 8 мм эпоксидного перекрестноточного стеклопластика сверлами диаметром 8 мм из быстрорежущей стали с углом при вершине 118° и углом наклона винтовой канавки 30°. Содержание стеклянных волокон принималось равным 30, 40, 50, 60 и 70%, частота вращения шпинделя – 470 об/мин; подача – 0,076 мм/об. Износ контролировался по мере сверления 10, 20, 40 и 55 отверстий. Полученные экспериментальные результаты представлены на рис. 1.

Анализ полученных результатов позволил авторам сделать вывод о том, что существенная интенсификация износа инструмента начинается с увеличением содержания наполнителя порядка 50%. Было получено линейное уравнение регрессии вида

$$\Delta h_z = 0,005 + 0,05 \cdot N + 0,12 \cdot V ,$$

© Г.Л. Хавин, 2016

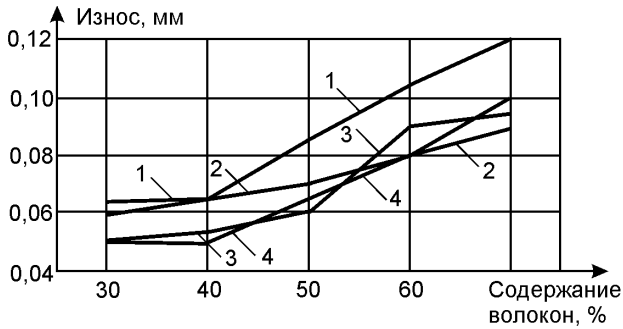


Рис. 1 – Влияние содержания стеклянных волокон и числа просверленных отверстий на износ инструмента: 1 – 55 отверстий; 2 – 40 отверстий; 3 – 20 отверстий; 4 – 10 отверстий

где  $\Delta h_z$  – величина износа по задней поверхности, мм;  $N$  – число просверленных отверстий;  $V$  – содержание наполнителя, %. Рост износа для композитов с большим содержанием наполнителя, как правило, объясняют увеличением числа контактных взаимодействий режущей кромки с волокнами. Вместе с тем увеличение числа взаимодействий также приводит к росту температуры в контакте и изменению условий резания волокон. Повышение температуры режущих кромок способствует усилению износа режущих кромок. Усиление износа режущих кромок по мере увеличения содержания наполнителя отмечено также в работе [3]. Представленные на рис. 1 результаты также хорошо согласуются с данными из [4], полученными при изучении изнашивания 6 стеклопластиков на основе нейлона.

Влияние ориентации армирующих волокон наполнителя на интенсивность изнашивания при сверлении практически не изучалась. Этот фактор иногда учитывался при комплексном экспериментальном исследовании износа инструмента вместе с другими параметрами процесса сверления. Это связано с тем, что в отличие от, например, токарной обработки влияние ориентации армирующего материала не играет существенной роли. Большинство армированных композитов по типу ориентации наполнителя подразделяют на:

- композиционные пластики с направленным расположением волокон на основе ровницы, обладающие ярко выраженной анизотропией свойств;
- композиты с взаимно перпендикулярным расположением волокон на основе тканей, такие как текстолиты;
- пластики с неориентированным расположением волокон или жгутов, имеющие хаотическое или случайное наполнение и, поэтому их считают условно изотропными.

В большинстве практических приложений влияние армирования в эмпирических законах для определения величины изнашивания сверл и их стойкости не учитывается. Так в [5] обработка экспериментальных данных по выяснению влияния на износ сверл из быстрорежущей стали подачи, частоты вращения шпинделя, диаметра сверла и ориентации армирования при сверлении стеклопластика, позволила сделать следующие выводы. Наибольший вклад в изнашива-

ние инструмента (потеря веса после сверления 75 отверстий) вносит подача, затем частота вращения шпинделя, диаметр инструмента и в последнюю очередь тип армирования. Его влияние оценивается примерно в 7,6% [5]. При этом вклад каждого типа армирования примерно одинаков для всех рассмотренных значений подач, скоростей и диаметров.

Несмотря на установившееся мнение об абразивной природе истирания инструмента в процессе сверления композитов, некоторыми исследователями доказана возможность доминирования процессов, имеющих отличный характер от абразивного. Так согласно [4] существует, по крайней мере, два случая, которые не отличаются по своему действию от классического абразивного изнашивания. В первом случае, когда имеет место жесткое контактное взаимодействие, волокна наполнителя вызывают появление трещин в зернах карбидов материала режущего инструмента. В результате происходит хрупкое разрушение подобное усталостному разрушению. Во втором случае, волокна наполнителя истирают связующее в инструменте, и инициирует появление усталостных трещин. Также считается, что анизотропия свойств карбидных зерен способствует их сдвигу и переориентации.

Проведенный в [6] экспериментальный анализ для трех типов инструментов из вольфрамового твердого сплава: спирального сверла с углом при вершине  $120^\circ$ ; spur point drill и сверла с двойной заточкой, для шести видов тканых эпоксидных углепластиков показал следующее. Эпоксидное связующее оказывает значительный эффект на характер повреждения композита при сверлении и величину осевой силы. Кроме того, свойства связующего оказывают существенное влияние на стойкость инструмента. Экспериментально был подтвержден факт того, что связующее с более высокой температурой отверждения обладает повышенными абразивными свойствами. Для сверла с двойной заточкой показано, что чем мягче связующее, тем выше стойкость инструмента.

Анализ процесса сверления всеми инструментами для пяти значений подачи и трех скоростей показал, что с точки зрения появления сколов и расслоений spur point drill показывает лучший результат для материала с жестким связующим. В то же время сверло с двойной заточкой дает лучшие результаты для материалов с мягким наполнителем.

**Цель работы.** Главной целью работы является всесторонний анализ процесса изнашивания сверл и формулировка критериев их затупления при сверлении композитов. Особое внимание уделяется анализу изнашивания сверл, конфигурация которых отличается от спирального сверла и его модификаций, износ которых имеет свою ярко выраженную специфику и является характерным в каждом случае. Геометрия режущей части специальных сверл определяет вид и интенсивность его изнашивания. Создание сверл со специальной геометрией режущей части, связано с обеспечением высокого качества обработки отверстий. При этом может не выполняться высокое сопротивление износу и стойкость инструмента.

Также целью работы является анализ влияния различных факторов технологического процесса, мар-

ки и типа переплетения композита, объемного содержания наполнителя.

**Постановка проблемы.** Изнашивание специальных сверл проявляется в каждом конкретном случае по-своему. Поэтому общая закономерность предсказания износа отсутствуют. Существует многочисленные экспериментальные работы, описывающие поведение того или иного типа инструмента.

Так в работе [7] были проведены эксперименты по сверлению стеклопластика с использованием стандартного спирального сверла, сверла конструкции Жирова и многогранного сверла диаметром 12 мм из твердого сплава. Скорость резания изменялась в двух диапазонах: от 15,7 м/мин до 62,8 м/мин и 440 м/мин до 600 м/мин, что позволило сравнить результаты изменения осевой силы, крутящего момента и поверхностной шероховатости при обычных и высоких скоростях. Подача изменялась от 0,01 мм/об до 0,06 мм/об. Для высоких скоростей шпинделя сила резания уменьшается, и сверла со специальной геометрией показывают лучшее качество обработки, особенно сверло конструкции Жирова. Многогранное сверло дает лучшее качество по эффекту расслаивания.

Изменение структуры материала главное условие появления расслаивания при получении отверстий в композитах [8–17]. Множество исследователей работало над обрабатываемостью полимерных композитов на основе совершенствования вершины сверла [8,18–24]. В работе [22] были выполнены экспериментальные исследования по сверлению эпоксидных углепластиков, и был сделан вывод о том, что высокая скорость и маленькая подача, главные факторы качественной обработки отверстий. Увеличение скорости резания дает увеличение производительности обработки. Другая возможная выгода увеличения скорости резания состоит в уменьшении силы резания [25]. Увеличение скорости резания приводит к уменьшению осевой силы и, как следствие, к уменьшению степени расслаивания поверхности на входе и выходе сверла. Сверление композитов с высокой скоростью было проанализировано в работах [26,27]. Был сделан вывод о том, что главной проблемой для работы с высокой скоростью является износ сверла. Четырех-, восьмигранные, Jo-point сверла, с перевернутым конусом и сверла со специальной геометрией все шире используются при проектировании инструмента для сверления композитов [24,27–30].

Сравнение работы сверл различной геометрии показало, что сверло Жирова работает с наименьшим значением осевой силы (порядка 20 Н) на высоких скоростях по сравнению с работой на традиционных скоростях (порядка 50 Н) и дает более высокую точность отверстия.

Распушивание волокон на выходе инструмента более интенсивно для спирального сверла и сверла Жирова. Многогранное сверло давало чистое отверстие. Расслаивание оценивалось традиционным фактором расслоения (отношение диаметров). Фактор расслоения возрастает с увеличением подачи и скорости вращения шпинделя. Шероховатость обработанной поверхности ( $Ra$ ) была лучшей для сверла Жирова (4–5 мкм) при низкой подаче. Многогранное сверло также дает высокое качество поверхности для низкой

подачи, по сравнению со стандартным спиральным сверлом. Сверление отверстий всеми видами сверл показывает высокую степень шероховатости поверхности и только незначительную разницу в факторе расслоения (возможно из-за высокой температуры). Отмечается, что для стандартного спирального сверла и многогранного сверла за пределами подачи 0,03 мм/об имеет место резкий рост величины шероховатости поверхности. Сверление всеми типами сверл обеспечивало высокую округлость отверстия, но сверло Жирова и многогранное сверло показывают более низкое отклонение, порядка 6–8 мкм, которое при сверлении композитов оценивается как незначительное.

С другой стороны, высокая скорость резания является главной причиной изнашивания сверл за счет температурного разогрева материала сверла, и абразивной природы стружки. По мере изнашивания инструмента начинает возрастать осевая сила. Так, стойкость инструмента может быть предсказана измерением осевой силы для соответствующего числа отверстий. Для изучения изнашивания твердосплавного сверла использовались условия резания: скорость резания 518 м/мин и подача 0,02 мм/об.

Для стандартного спирального сверла осевая сила в начале резания резко возрастает потому, что идет этап приработки. Начальный износ длится до 10 отверстий, и затем стабилизируется. По достижении 325 просверленных отверстий осевая сила начинает круто возрастать из-за быстрого изнашивания, и составляет для 325-го отверстия 60 Н. Для сверла Жирова осевая сила по мере износа также увеличивается резко. Начальный износ длится примерно до 25-го отверстия, после чего изнашивание стабилизируется и опять начинает резко расти после 340 отверстий, достигая при этом 30 Н. Для многогранного сверла до 10-го отверстия осевая сила резко возрастает с 10 до 40 Н, после чего изнашивание стабилизируется и для 60-го отверстия составляет 60 Н. Далее осевая сила резко увеличивается из-за износа.

В работе [31] было экспериментально исследовано сверление тканого углепластикового ламината переплетением 2/2, толщиной 10 мм, с содержанием наполнителя 55–60%, четырьмя типами инструментов из твердого сплава без покрытия диаметром 4 мм: двугранное стандартное спиральное сверло – 1; трехгранные сверла с углами при вершине 150 и 135° – 2,3 и специальное сверло с 4-мя прямыми гранями и вершиной сложной конфигурации в виде двух ступеней – 4. В проведенных экспериментах контролировалось две основные величины: максимальный износ граней  $VB_{max}$ , представленный на рис.2,а и закругление режущей кромки CER, представленное на рис.2,б.

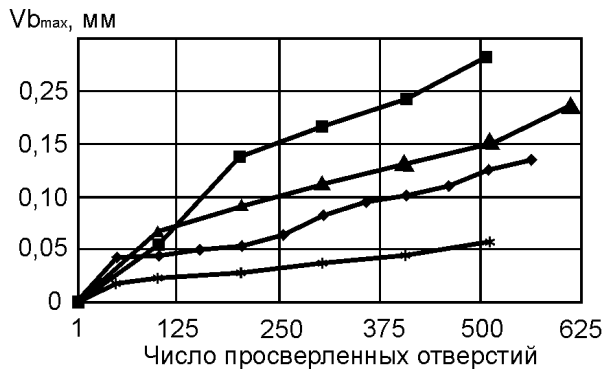
**Результаты анализа исследований.** Анализ полученных результатов позволил сделать авторам ряд важных выводов. Во-первых, наблюдается очень четкая взаимосвязь между значением величины закругления режущей кромки и величиной действующей нагрузки, а также между закруглением и расслоением материала на входе/выходе инструмента. Во-вторых, закругление режущей кромки развивается относительно равномерно и практически идентично для всех

видов инструментов, использованных в экспериментах. Среди инструментов наибольший износ грани наблюдался для второго и третьего инструмента (трехгранные сверла с углом при вершине 150 и 135°), а затем для первого. Сверло с четырьмя очень длинными режущими гранями, показало самый низкий износ по граням. Зависимость осевой силы и крутящего момента от износа по грани носят традиционный квазилинейный характер. При этом наибольшие значения осевой силы имели место для сверла с углом при вершине 150°, а наибольшие значения крутящего момента для четвертого инструмента с четырьмя режущими кромками.

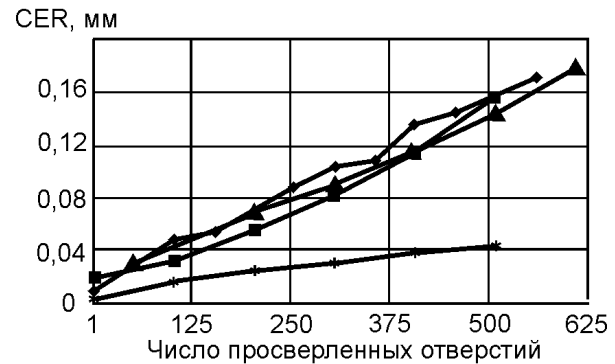
Зависимость величины закругления режущей кромки от числа просверленных отверстий носит линейный характер и практически идентично для всех видов инструментов кроме четвертого, у которого значения закругления режущей кромки заметно ниже. С увеличением закругления режущей кромки растут значения осевой силы и крутящего момента. Причем наиболее интенсивно осевая сила растет для инструмента с углом при вершине 150°, а значение крутящего момента для четвертого инструмента. Результаты

зависимости влияния износа по грани и закругления режущей кромки по своему качественному влиянию идентичны между собой.

Изнашивание ступенчатого и стандартного спирального сверла экспериментально изучалось в [32]. Проведено сравнительное исследование работы инструментом из твердосплавного материала К20 с углом при вершине 136° и вторым углом у ступенчатого сверла 90°. Задний угол у спирального сверла – 8,58°, у ступенчатого сверла – 8,65°, угол наклона винтовой канавки – 32,5°. Частота вращения шпинделя принималась равной 2020 и 2750 об/мин, подача принималась – 0,05; 0,10; 0,15 и 0,30 мм/об. Экспериментальные результаты работы ступенчатым сверлом представленной геометрии в выбранном диапазоне изменения технологических параметров показали, что стойкость ступенчатого инструмента заметно лучше, чем традиционного спирального. Это можно видеть из рис.3, где представлены кривые износа в зависимости от числа просверленных отверстий. При этом значение осевой силы, как и следовало ожидать, для спирального сверла растет более интенсивно, чем для ступенчатого сверла, рис.4.



а



б

Рис. 2 – Зависимость величины максимального износа по грани режущих инструментов – а и закругления режущей кромки инструментов – б, от количества просверленных отверстий: скорость резания – 50 м/мин; подача – 0,1 мм/об; сверление без охлаждения

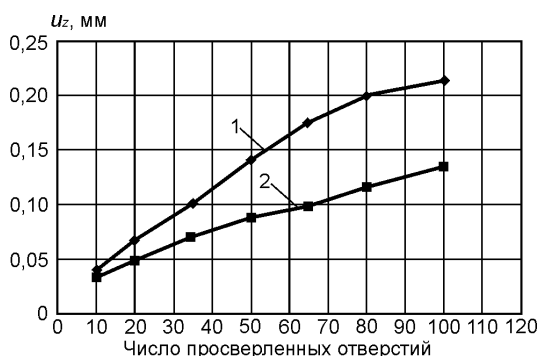


Рис. 3 – Зависимость величины износа по задней поверхности сверла  $u_z$  в зависимости от числа просверленных отверстий [32]: 1 – стандартное спиральное сверло; 2 – ступенчатое сверло

**Выводы.** Из теории и практики сверления композитов известно, что с увеличением подачи растет осевая сила и это приводит к интенсификации расслоения на входе и выходе инструмента и росту шероховатости.

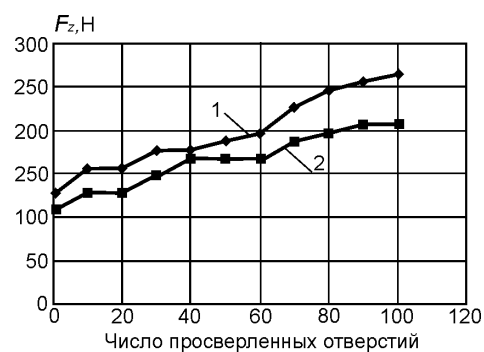


Рис. 4 – Изменение величины осевого усилия  $F_z$  от числа просверленных отверстий [32]: 1 – стандартное спиральное сверло; 2 – ступенчатое сверло

Это явление характерно практически для всех видов сверл. Лучшее качество поверхности получается при сверлении твердосплавным сверлом практически для всех сочетаний подачи и частоты вращения шпинделя.

Величина шероховатости независимо от типа и формы армирования, типа связующего, метода укладки и изготовления композита для выбранного инструмента, зависит, прежде всего, от сочетания величины подачи и частоты вращения шпинделя.

Из представленных физических представлений, величина разрушения вокруг отверстия возрастает с ростом осевой силы и имеет тенденцию к сглаживанию при значительном увеличении осевой силы. Величина дефектов возрастает с увеличением диаметра отверстия и можно предположить, что несоответствие диаметров будет расти более быстро с его увеличением.

Высокая скорость и малая подача наилучшее сочетание для эффективной обработки внутри выбранного интервала изменения параметров.

Специальная геометрия сверл позволяет улучшить качество производимых отверстий, особенно сверло Жирова. Многогранное сверло позволяет сверлить отверстия лучше других. Специальная серповидная форма режущих краев позволяет предварительно деформировать волокна в направлении растяжения и отделяет их в осевом направлении, что образует чистый срез и гладкую поверхность. Многогранное сверло дает также меньшее расслаивание.

Сверло Жирова и многогранное сверло производят лучшую финишную поверхность (3-5 мкм) для низких подач, по сравнению со спиральным сверлом. С увеличением скорости резания значительно уменьшается осевая сила, однако просверленное отверстие обладает повышенной шероховатостью и только незначительным отличием фактора расслаивания, что можно объяснить действием высокой температуры сверления.

Изучение сверления при высоких скоростях резания показало, что наилучшим образом себя зарекомендовало сверло Жирова так, как работает с более низкой осевой силой и имеет наибольшую стойкость.

#### Список литературы

- Буловский П.И. Механическая обработка стеклопластиков / П.И. Буловский, Н.А. Петрова – Л.: Машиностроение, 1969. – 152 с.
- Influence of fibre volume reinforcements in drilling GFRP laminates / D.A. Budan, S. Basavarajappa, M.K. Prasanna, A.G. Joshi // Journal of Engineering Science and Technology. – 2011. – V.6, N 6. – P.733–744.
- Rawat S. Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites / S. Rawat, H. Attia // Wear. – 2009. – 267, N5-8. – P. 1022–1030.
- Jawali D. Physicomechanical properties, machinability and morphological behavior of short glass fiber reinforced nylon 6 composites /D. Jawali, B. Siddeshwarappa, P. Siddaramaiah// Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2006. – V.25, N13. – P.1409–1418.
- Rao S.U. Impact of process factors on twist drill wear in machining GFRP composites by applying Taguchi design analysis and ANOVA technique / S.U. Rao, L.L.R. Rodrigues // International Journal of Advanced Technology & Engineering Research. – 2014. –V.4, N 3. – P. 12–17.
- Royer R. Influence of CFRP properties on drilling / R. Royer, E. Merson // 21 Congress Francais de Mecanique, Bordeaux. –2013, 26 au 30 aout. – P. 1–6.
- Krishnaraj V. Effects of Drill Points on Glass Fibre Reinforced Plastic Composite While Drilling at High Spindle Speed / V. Krishnaraj // Proceedings of the World Congress on Engineering, 2008. – Vol. II, WCE 2008, July 2–4, 2008, London, U.K.
- Davim P.J. Study of delamination in drilling fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments / P.J. Davim, P. Reis // Computer Structure. – 2003 – 59. – P. 481–487.
- Tsao C.C. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material / C.C. Tsao, H. Hocheng // Int. J. of Machine tools and Manufacture. – 2004. – 44. – P. 1085–1090.
- Hocheng H. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits / H. Hocheng, C.C. Tsao // J of Mat. Proc. Tech. –2004 – 140. – P. 335–339.
- Drilling of composite structures / F. Lachaud, R. Piquet, F. Collobet, L. Surcin // Composite Structures. – 2001. – V.52. – P. 511–516.
- Ho-Cheng H. On drilling characteristics of fiber-reinforced thermosets and thermoplastics / H. Ho-Cheng, H.Y. Puw // Int. J. of Mach. Tool and Manufacture. – 1992. – 32, N4 – P. 583–592.
- Bhattacharya D. A study of hole drilling in Kevlar Composites / D.A. Bhattacharya, D.P.W. Horrigan// Comp. Sci. & Tech.– 1998. – 58.– P. 267–283.
- Dillio A. Cutting mechanism in drilling of aramide composites / A. Dillio, V. Tagliaferri, F. Veniali // Int J of Mach. Tool & Manuf. 1991. – 31, N2 – P. 155–165.
- Tsao C.C. Effect of exit back-up on delamination in drilling composite materials using saw drill and core drill / C.C. Tsao, H. Hocheng // Int. J of Mach. Tools & Manuf. – 2005. – 45. – P. 1261–1270.
- Tsao C.C. Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills / C.C. Tsao, H. Hocheng // Int. J. of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – 45. – P. 1282–1287.
- Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills / R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider // Composites Part A: Appl. Sci. Manufact. – 2003. – 31, N10. – P. 1107–1115.
- Davim P.J. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up / P.J. Davim, P. Reis, A.C. Conceicao // Comp. Sci. and Tech. – 2004. – 64. – P. 289–297.
- Ramkumar J. Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates / J. Ramkumar, S.K. Malhotra, R. Krishnamurthy // J. of Math. Proc. Tech. 2003. – 152. – P. 329–332.
- An enhancement of the machining performance of GFRP by oscillatory assisted drilling / J. Ramkumar, S. Aravindan, S.K. Malhotra, R. Krishnamurthy // Int. J Adv. Manuf. Tech. – 2004. – 23. – P. 240–224.
- Bhatnagar N. Experimental investigation of drilling of CFRP composites / N. Bhatnagar, N.K. Naik, N. Ramakrishnan // Matls. and Manuf. Proc. – 1993.– 12, N8. – P. 683–701.
- Chen W.-C. Some Experimental investigation in the drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates / W.-C. Chen // Int. J of Mach. Tool & Manuf. – 1997. – 37, N8. – P. 1097–1108.
- Khashaba U.A. Delamination in drilling GFR-thermoset composite structures / U.A. Khashaba // Computer structure. – 2004. – 63, N3. – P. 313–327.
- Sonbaty El. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites / El. Sonbaty, U.A. Khashaba, T. Machaly // Computer Structure. – 2004. – 63. – P. 329–338.
- Raj Aggarwal T. General theory and its application in the high-speed milling of aluminum / T. Raj Aggarwal // Robert I. King (Ed), Handbook of High-speed Machining Technology, Chapman and Hall, – 2004. – P. 197–240.
- Lin S.C. Drilling unidirectional glass fiber-reinforced composite materials at high speed / S.C. Lin, J.-M. Shen // J Comp. Mat. – 1999. – 33, N9. – P. 827–851.
- Abrate S. Machining of Composites / S. Abrate // In: Mallick PK, editor Composites engineering hand book, New York, Marcel Dekker Inc. – 1997. – P. 777–807.
- Komaduri R. Machining of fibre-reinforced composites / R. Komaduri // Mechanical Engineering. – 1993. – 115, N4. – P. 58–66.
- Wu S.M. Multifacet drills / S.M. Wu // In: Robert I. King, Editor, Handbook of High-speed Machining Technology, London: Chapman and Hall. – 1985. – P. 305–316.
- Kohkonen K.E. Composite Machining / K.E. Kohkonen, P. Nitin // In: Peters ST, Editor, Hand book of Composites, California, Chapman & Hall. – 1998. – P. 596–609.
- Faraz A. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weibert // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2009. – 49. – P. 1185–1196.
- Effect of tool geometry in drilling of aerospace materials / N.V. Kumar, G.G. Nathan, Dr. V. Krishnaraj, G. Sasicharan // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2013. –V.4, N8. – P. 733–744.

**Bibliography (transliterated)**

1. Bulovskiy P.I., Petrova N.A. *Mechanicheskaya obrabotka stekloplastikov* [Machining of Glass Reinforced plastic], Leningrad, Mashinostroenie, 1969. 152 p.
2. Budan D.A., Basavarajappa S., Prasanna M.K., Joshi A.G. Influence of fibre volume reinforcements in drilling GFRP laminates. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2011, vol. 6, no. 6, pp. 733–744.
3. Rawat S., Attia H. Wear mechanisms and tool life management of WC–Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites. *Wear*. 2009, vol. 267, no. 5–8, pp. 1022–1030.
4. Jawali D., Siddeshwarappa B., Siddaramaiah P. Physicomechanical properties, machinability and morphological behavior of short glass fiber reinforced nylon 6 composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2006, vol. 25, no. 13, pp. 1409–1418.
5. Rao S.U., Rodrigues L.L.R. Impact of process factors on twist drill wear in machining GFRP composites by applying Taguchi design analysis and ANOVA technique. *International Journal of Advanced Technology & Engineering Research*. 2014, vol. 4, no. 3, pp. 12–17.
6. Royer R., Merson E. Influence of CFRP properties on drilling [Influence of CFRP properties on drilling]. *21 Congress Francais de Mecanique, Bordeaux*. 2013, 26 au 30 aout., pp. 1–6.
7. Krishnaraj V. Effects of Drill Points on Glass Fibre Reinforced Plastic Composite While Drilling at High Spindle Speed [Effects of Drill Points on Glass Fibre Reinforced Plastic Composite While Drilling at High Spindle Speed]. *Proceedings of the World Congress on Engineering, 2008*, vol. II, WCE 2008, July 2–4, 2008, London, U.K.
8. Davim P.J., Reis P. Study of delamination in drilling fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Computer Structure*. 2003, no. 59, pp. 481–487.
9. Tsao C.C., Hocheng H. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *Int. J of Machine tools and Manufacture*. 2004, no. 44, pp. 1085–1090.
10. Hocheng H., Tsao C.C. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *J. of Mat. Proc. Tech*. 2004, no. 140, pp. 335–339.
11. Lachaud F., Piquet R., Collobet F., Surcin L. Drilling of composite structures. *Composite Structures*. 2001, vol. 52, pp. 511–516.
12. Ho-Cheng H., Puw H.Y. On drilling characteristics of fiber-reinforced thermosets and thermoplastics. *Int. J. of Mach. Tool and Manufacture*. 1992, vol. 32, no. 4, pp. 583–592.
13. Bhattacharya D., Horrigan D.P.W. A study of hole drilling in Kevlar Composites. *Comp. Sci. & Tech*. 1998, vol. 58, pp. 267–283.
14. Dillio A., Tagliaferri V., Veniali F. Cutting mechanism in drilling of aramid composites. *Int. J of Mach. Tool & Manuf*. 1991, vol. 31, no. 2, pp. 155–165.
15. Tsao C.C., Hocheng H. Effect of exit back-up on delamination in drilling composite materials using saw drill and core drill. *Int. J of Mach. Tools & Manuf*. 2005, vol. 45, pp. 1261–1270.
16. Tsao C.C., Hocheng H. Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills. *Int. J of Machine Tools & Manufacture*. 2005, vol. 45, pp. 1282–1287.
17. Piquet R., Ferret B., Lachaud F., Swider P. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills. *Composites Part A: Appl. Sci. Manufact.* 2003, vol. 31, no. 10, pp. 1107–1115.
18. Davim P.J., Reis P., Conceicao A.C. Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Comp. Sci. and Tech*. 2004, vol. 64, pp. 289–297.
19. Ramkumar J., Malhotra S.K., Krishnamurthy R. Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates. *J of Math. Proc. Tech*. 2003, no. 152, pp. 329–332.
20. Ramkumar J., Aravindan S., Malhotra S.K., Krishnamurthy R. An enhancement of the machining performance of GFRP by oscillatory assisted drilling. *Int. J Adv. Manuf. Tech*. 2004, no. 23, pp. 240–224.
21. Bhatnagar N., Naik N.K., Ramakrishnan N. Experimental investigation of drilling of CFRP composites. *Mats. and Manuf. Proc*. 1993, vol. 12, no. 8, pp. 683–701.
22. Chen W.-C. Some Experimental investigation in the drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *Int. J of Mach. Tool & Manuf*. 1997, vol. 37, no. 8, pp. 1097–1108.
23. Khashaba U.A. Delamination in drilling GFR-thermoset composite structures. *Computer structure*. 2004, vol. 63, no. 3, pp. 313–327.
24. Sonbaty El., Khashaba U.A., Machaly T. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. *Computer Structure*. 2004, vol. 63, pp. 329–338.
25. Raj Aggarwal T. General theory and its application in the high-speed milling of aluminum. *Handbook of High-speed Machining Technology, Chapman and Hall*. 2004. pp. 197–240.
26. Lin S.C., Shen J.-M. Drilling unidirectional glass fiber-reinforced composite materials at high speed. *J Comp. Mat*. 1999, vol. 33, no. 9, pp. 827–851.
27. Abrate S. Machining of Composites. In: *Mallick PK, editor Composites engineering hand book, New York, Marcel Deckker Inc*. 1997, pp. 777–807.
28. Komaduri R. Machining of fibre-reinforced composites. *Mechanical Engineering*. 1993, vol. 115, no. 4, pp. 58–66.
29. Wu S.M. Multifacet drills. In: *Robert I. King, Editor, Handbook of High-speed Machining Technology, London: Chapman and Hall*. 1985, pp. 305–316.
30. Kohkonen K.E., Nitin P. Composite Machining. In: *Peters ST, Editor, Hand book of Composites, California, Chapman & Hall*. 1998, pp. 596–609.
31. Faraz A., Biermann D. Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2009, no. 49, pp. 1185–1196.
32. Kumar N.V., Nathan G.G., Krishnaraj Dr.V., Sasicharan G. Effect of tool geometry in drilling of aerospace materials. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2013, vol. 4, no. 8, pp. 733–744.

Поступила (received) 31.10.16

Робота виконана по проекту М2133Ф фінансированого Министерством образования и науки Украины.

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Знос інструменту і критерії затуплення при свердленні композити/ Г.Л. Хавін// Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 33 (1205). – С. 106–111. – Библиогр.: 32 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Изнашивание инструмента и критерии затупления при сверлении композитов / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 33 (1205). – С. 106–1011. – Библиогр.: 32 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Tool wear and criteria of tool dulling when drilling composit/ G.L. Khavin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.106–111. – Bibliogr.: 32. – ISSN 2079-004X.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Хавін Геннадій Львович** – докт. техн. наук, проф, НТУ «ХП», м. Харків, тел.: (057)-720-66-25, e-mail: gen-nadiy.khavin@mail.ru;

**Хавін Геннадий Львович** – докт. техн. наук, проф, НТУ «ХП», г. Харьков, тел.: (057)-720-66-25, e-mail: gennadiy.khavin@mail.ru;

**Khavyn Hennadiy Lvovych** – Doctor of Technical Sciences, professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25, e-mail: gennadiy.khavin@mail.ru.

УДК 681.518.3

О.Ф. ЄНІКЄВ, Ф.М. ЄВСЮКОВА, О.Ю. ПРИХОДЬКО

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ ПРОГРАМНОГО ЗАДАВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГ

Проведене математичне моделювання блоків, які складають апаратні засоби програмного задавання швидкості обертання шліфувального круга, а також встановлено їхнє запізнення. У результаті перетворень структурної схеми апаратних засобів отримано передатну функцію. На основі мінімізації квадратичного критерію якості розроблено пристрій обробки сигналу швидкості. Складено схему комп'ютерного моделювання процесу перетворення вхідної інформації. Встановлено ефективність апаратних засобів, які розроблені.

**Ключові слова:** апаратні засоби, запізнення, комп'ютерне моделювання.

Проведено математическое моделирование устройств, которые образуют аппаратные средства программного задания скорости вращения шлифовального круга, и установлено их запаздывание. В результате преобразований структурной схемы аппаратных средств получена передаточная функция. На основе минимизации квадратичного критерия качества разработано устройство обработки сигнала скорости. Составлена схема компьютерного моделирования процесса преобразования аппаратными средствами входной информации. Установлена эффективность разработанных аппаратных средств.

**Ключевые слова:** аппаратные средства, запаздывание, компьютерное моделирование.

The mathematical design of devices that form vehicle facilities of programmatic task of speed of rotation of diamond-impregnated is conducted, and their delay is set. As a result of transformations of flow diagram of vehicle facilities a transmission function is got. On the basis of minimization of quadratic criterion of quality the device of the signal of speed processing is worked out. Diagrammatized computer design of process of transformation by vehicle facilities of entrance information. Efficiency of the worked out vehicle facilities is set.

**Keywords:** vehicle facilities, delay, computer design.

**Вступ.** Програмне керування інформаційно-вимірною системою (ІВС) рухами апаратних засобів верстату при виконанні процесу алмазного шліфування (АШ) скорочує час обробки деталі та забезпечує задану шорсткість поверхні [1]. Швидкість обертання шліфувального круга (ШК) є одним із технологічних параметрів процесу АШ, який суттєвим чином впливає на якість поверхні деталі. Сучасне машинобудівне виробництво характеризується підвищеним рівнем завад різноманітної фізичної природи, який визначає точність задавання апаратними засобами швидкість обертання ШК. Обмежена швидкодія перетворення вхідної інформації є також суттєвим недоліком відомих апаратних засобів.

**Постановка проблеми.** Створення апаратних засобів задавання швидкості обертання ШК, які мають потрібну завадостійкість та точність забезпечення вихідного сигналу. Це можливе шляхом побудови математичних моделей компонент апаратних засобів з урахуванням факторів невизначеності, які обумовлено дією завад та похибками вимірювань вхідних сигналів. Синтез пристрою обробки сигналу швидкості обертання ШК на основі еталонної математичної моделі апаратних засобів, а також складання схеми комп'ютерного моделювання процесу перетворення інформації. Встановлення ефективності розроблених

апаратних засобів у результаті аналізу вихідного сигналу процесу перетворення інформації.

**Моделювання апаратних засобів.** Виконаємо розробку математичних моделей компонент та аналіз структурної схеми (рис. 1) виконуючого механізму (ВМ) з метою отримання виразу для передатної функції.

Динамічні особливості широтно-імпульсного перетворювача (ШПІ) дозволяють подати його у вигляді аперіодичного ланцюга із запізненням [2]. Передатна функція такого ланцюга має вигляд

$$W_{\phi\tau}(p) = \frac{K_{\phi\tau} e^{-\tau_{\phi\tau} p}}{T_{\phi\tau} p + 1}, \quad (1)$$

де  $K_{\phi\tau}$  – коефіцієнт підсилення,  $T_{\phi\tau}$  – постійна часу,  $\tau_{\phi\tau}$  – запізнення.

Динамічні особливості тиристорного випрямляча (ТВ) із імпульсно-фазовим керуванням дозволяють подати його аперіодичного ланцюга із запізненням [2]. Передатна функція такого ланцюга має вигляд

$$W_{\delta\alpha}(p) = \frac{K_{\delta\alpha} e^{-\tau_{\delta\alpha} p}}{T_{\delta\alpha} p + 1}, \quad (2)$$

де  $K_{m\phi}$  – статичний коефіцієнт підсилення блоку ТВ,  $\tau_{\delta\alpha}$  – запізнення,  $T_{m\phi}$  – постійна часу фільтру нижніх частот, який встановлено для підвищення завадостійкості.

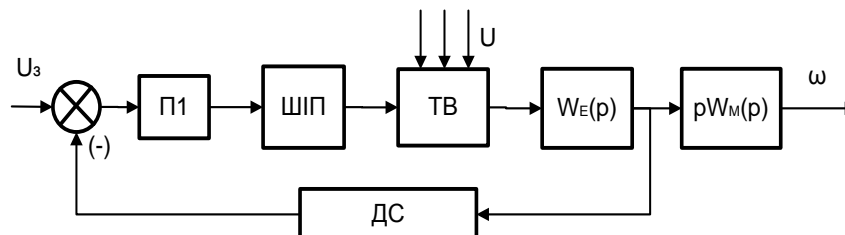


Рис. 1 – Структурна схема ВМ

© О.Ф. Єнікєв, Ф.М. Євсюкова, О.Ю. Приходько, 2016



Статичний коефіцієнт підсилення блоку ТВ визначимо за допомогою такого виразу [2]

$$K_{\delta\alpha} = \frac{\sqrt{2m}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \Theta, \quad (3)$$

де  $m$  – кількість фаз живлячої мережі,  $\Theta$  – кут керування.

Блок підсилення сигналів (П1) у динамічному відношенні подаємо пропорційним ланцюгом із коефіцієнтом підсилення  $k_y$ . Задавач струму побудовано за принципом МДМ-підсилювача, який має передатну функцію аперіодичного ланцюга першого порядку зі частотою  $\Omega_{\delta c}$  та коефіцієнтом підсилення  $K_{\delta c}$  [2]

$$W_{\text{ан}}(p) = \frac{K_{\text{ан}}}{T_{\text{ан}}p + 1}, \quad (4)$$

де  $K_{\text{ан}} = (K_{\delta\alpha} K_{\phi\gamma} k_A k_o)^{-1}$  – обчислюємо з умови нормування коефіцієнтів підсилення ланцюгів.

На основі виразів (1), (2), (3) та (4) після перетворень отримано передатну функцію замкненого контуру аналогової системи у такому вигляді

$$W_1(p) = \frac{k_o k_A K_{\phi\gamma} K_{\delta\alpha} (T_{\text{ан}}p + 1)}{e^{\tau_{\phi\gamma} p} e^{\tau_{\delta\alpha} p} (T_{\phi\gamma} p + 1)(T_{\delta\alpha} p + 1)(T_{\text{ан}}p + 1)(T_A p + 1) + 1}. \quad (5)$$

З урахуванням  $W_A(p) = \frac{K_A}{T_A p + 1}$  та  $W_I(p) = \frac{K_I}{T_I p + 1}$

передатна функція аналогової системи набуває такого вигляду

$$W_2(p) = \frac{k_o k_A K_{\phi\gamma} K_{\delta\alpha} (T_{\text{ан}}p + 1) k_I p}{\left[ e^{\tau_{\phi\gamma} p} e^{\tau_{\delta\alpha} p} (T_{\phi\gamma} p + 1)(T_{\delta\alpha} p + 1)(T_{\text{ан}}p + 1)(T_A p + 1) + 1 \right] (T_I p + 1)}. \quad (6)$$

Виконаємо таку заміну експоненціальних функцій  $e^{\tau p} \approx (1 + \tau p)$ . Після перетворень отримали вираз для передатної функції у вигляді відношення ступеневих поліномів

$$W_3(p) = \frac{(b_1^* p + b_0^*) p}{a_7 p^7 + a_6 p^6 + a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (7)$$

де  $b_1^* = k_o k_A K_{\phi\gamma} K_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} k_I$ ,  $b_0^* = k_o k_A K_{\phi\gamma} K_{\delta\alpha} k_I$ ,

$$a_7 = \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} T_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} T_A T_I,$$

$$a_6 = \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} T_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} T_A + T_I \left[ \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} T_{\phi\gamma} (T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} + T_{\delta\alpha} T_A + T_A T_{\text{ан}}) + T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} T_A (\tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} + \tau_{\delta\alpha} T_{\phi\gamma} + \tau_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha}) \right],$$

$$a_5 = \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} T_{\phi\gamma} (T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} + T_{\delta\alpha} T_A + T_A T_{\text{ан}}) + T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} T_A (\tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} + \tau_{\delta\alpha} T_{\phi\gamma} + \tau_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha}) + T_I \left[ \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} T_{\phi\gamma} (T_{\delta\alpha} + T_{\text{ан}} + T_A) + T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} T_A (\tau_{\delta\alpha} + \tau_{\phi\gamma} + T_{\phi\gamma}) + (\tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} + \tau_{\delta\alpha} T_{\phi\gamma} + \tau_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha}) (T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} + T_{\delta\alpha} T_A + T_A T_{\text{ан}}) \right],$$

$$a_4 = \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} T_{\phi\gamma} (T_{\delta\alpha} + T_{\text{ан}} + T_A) + T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} T_A (\tau_{\delta\alpha} + \tau_{\phi\gamma} + T_{\phi\gamma}) + (\tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} + \tau_{\delta\alpha} T_{\phi\gamma} + \tau_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha}) (T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} + T_{\text{ан}} T_A + T_{\delta\alpha} T_A) + T_I \left[ \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} T_{\phi\gamma} + T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} T_A + (T_{\delta\alpha} + T_A + T_{\text{ан}}) (\tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} + \tau_{\delta\alpha} T_{\phi\gamma} + \tau_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha}) + (\tau_{\delta\alpha} + \tau_{\phi\gamma} + T_{\phi\gamma}) (T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} + T_{\text{ан}} T_A + T_{\delta\alpha} T_A) \right],$$

$$a_3 = \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} T_{\phi\gamma} + T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} T_A + (T_{\delta\alpha} + T_A + T_{\text{ан}}) (\tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} + \tau_{\delta\alpha} T_{\phi\gamma} + \tau_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha}) + (\tau_{\delta\alpha} + \tau_{\phi\gamma} + T_{\phi\gamma}) (T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} + T_{\text{ан}} T_A + T_{\delta\alpha} T_A) + T_I \left[ \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} + \tau_{\delta\alpha} T_{\phi\gamma} + \tau_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha} + T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} + T_{\delta\alpha} T_A + T_{\text{ан}} T_A + (\tau_{\delta\alpha} + \tau_{\phi\gamma} + T_{\phi\gamma}) (T_{\delta\alpha} + T_{\text{ан}} + T_A) \right],$$

$$a_2 = \tau_{\delta\alpha} \tau_{\phi\gamma} + \tau_{\delta\alpha} T_{\phi\gamma} + \tau_{\phi\gamma} T_{\delta\alpha} + (\tau_{\delta\alpha} + \tau_{\phi\gamma} + T_{\phi\gamma}) (T_{\delta\alpha} + T_{\text{ан}} + T_A) + T_{\delta\alpha} T_{\text{ан}} + T_{\delta\alpha} T_A + T_{\text{ан}} T_A + T_I (\tau_{\delta\alpha} + \tau_{\phi\gamma} + T_{\phi\gamma} + T_{\delta\alpha} + T_{\text{ан}} + T_A),$$

$$a_1 = \tau_{\delta\alpha} + \tau_{\phi\gamma} + \tau_{\delta\alpha} + T_{\phi\gamma} + \tau_{\phi\gamma} + T_{\phi\gamma} + 2T_I, \quad a_0 = 2.$$

На рис.2 подано логарифмічні амплітудо та фазочастотні характеристики ВМ, які визначено за допомогою середовища *Matlab*.

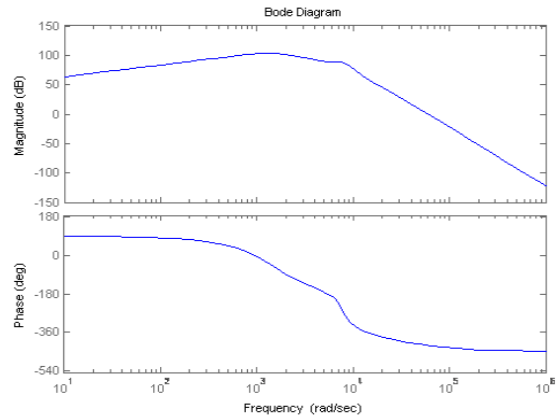


Рис. 2 – Частотні характеристики ВМ

У результаті пошуку полюсів передатної функції (7) отримали наступні данні:

```
ans = 1.0e+004 *
-2.3831
-0.0139 + 0.0771i
-0.0139 - 0.0771i
-0.1983
-0.0816 + 0.0105i
-0.0816 - 0.0105i
-0.122
```

Аналіз отриманої інформації дозволяє зробити наступні висновки:

- умові стійкості аналогової системи задовольняють усі корні характеристичного рівняння;
- корні два, три, п'ять та шість впливають на початок перехідного процесу оскільки малі за величиною;
- аналогова система без втрат точності подається такою передатною функцією

$$W_4(p) = \frac{b_0^* p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (8)$$

де постійні часу визначаються за допомогою першого та четвертого коренів характеристичного рівняння, а сьомий відповідає нулю передатної функції.

Швидкісна похибка аналогової системи встановлена у результаті статистичної обробки вимірів із багаторазовими спостереженнями. Відсутність навантаження подавалась холостим ходом ВМ. Сигнал швидкості вимірювався частотоміром ЧЗ-32 по вихідному сигналу перетворювача ROD-428. На рис. 3 подано гістограму коливань швидкості обертання ВМ. Обсяг вибірки склав 132 вимірів. Статистичні параметри цього розподілу такі

$$\bar{O} = 0, \quad \sigma = 0.0136, \quad A = 0, \quad E = -0.691. \quad (9)$$

Рівняння згладженої кривої розкиду вихідного коду має вигляд

$$f_1(x) = 36.762e^{-73.544|x|} \quad \text{при } x \in (-0.03, 0.03). \quad (10)$$

Скористуємось інформаційним підходом для визначення похибки проведених вимірювань з багатора-

зовими спостереженнями. Для отриманого закону розподілу похибки маємо

$$\ln f_1(x) = -\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma} \quad (11)$$

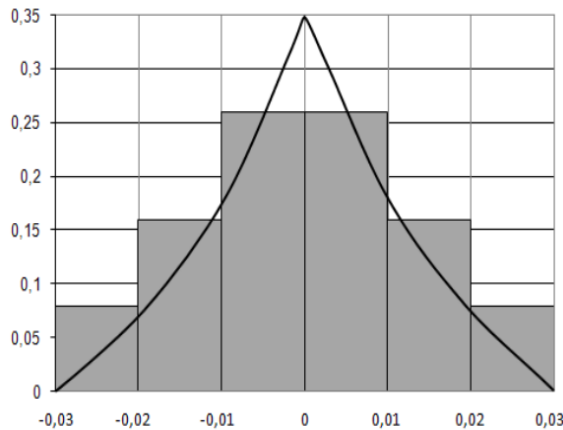


Рис. 3 – Гістограма флуктуацій ВМ  
Звідси ентропія похибки вимірів

$$H\left(\frac{x}{x_r}\right) = \ln 0.0272 \quad (12)$$

Ентропійний інтервал невизначеності вимірів склав  $\Delta_1 = 0.0136$ . Величина швидкісної похибки доводить ефективність аналогової системи.

Структурна схема апаратних засобів обробки сигналу швидкості обертання ШК подано на рис. 4. На рисунку позначено заваду ( $\eta$ ) у вигляді сили різання матеріалу заготівлі. Виконаємо моделювання компонент та аналіз структурної схеми з метою отримання виразу для передатної функції.

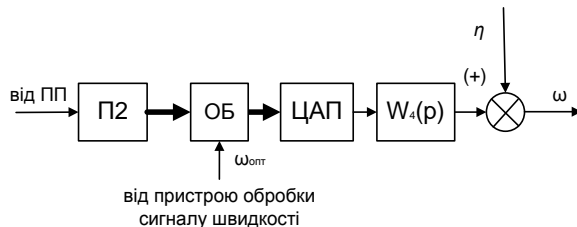


Рис. 4 – Архітектура апаратних засобів обробки сигналу швидкості

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) виконано на базі мікросхеми K572ПА2, яка має вмонтований 12-розрядний регістр для зберігання цифрової інформації. За принципом дії ЦАП належить до сімейства поліноміальних екстраполяторів. Вихідний сигнал екстраполятора нульового порядку є ступінчастим. Тоді імпульсна передатна функція такого пристрою є відклик на дельта-функцію при нульових початкових умовах [3]

$$W_5(p) = \frac{1 - e^{-p\tau_r}}{p} \quad (13)$$

Передатна функція пристрою цифрової обробки сигналу швидкості обертання ШК як деякого довільного цифрового фільтра подається у вигляді [3]

$$W_6(p) = \frac{1}{\tau_r} (1 - e^{-p\tau_r}) \quad (14)$$

Динамічні особливості П2 дозволяють подати його аперіодичним ланцюгом із запізненням [3]. Передатна функція такого ланцюга має вигляд

$$W_7(p) = \frac{K_3 e^{-\tau_3 p}}{T_3 p + 1} \quad (15)$$

де  $K_3 = 1/b_0^*$  – коефіцієнт посилення,  $T_3$  – постійна часу,  $\tau_3 = T_0$  – запізнення.

На основі виразів (8) та (15) у результаті аналізу структурної схеми апаратних засобів обробки сигналу швидкості обертання ШК та математичних перетворень отримано передатну функцію в такому вигляді [3]

$$W_8(p) = \frac{b_0^* \tau_r p [T_3 \tau_3 p^2 + (T_3 + \tau_3)p + 1]}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1} \quad (16)$$

де  $a_4 = T_1 T_2 T_3 \tau_3$ ,  $a_3 = T_1 T_2 (T_3 + \tau_3) + (T_1 + T_2) T_3 \tau_3$ ,  $a_2 = T_1 T_2 + T_3 \tau_3 + \tau_r + (T_1 + T_2)(T_3 + \tau_3)$ ,  $a_1 = T_1 + T_2 + T_3 + \tau_3$ .

Визначено z-перетворення передатних функцій. Z-перетворення передатної функції аналогової системи після відповідних перетворень набуло такого вигляду

$$\frac{W_4(p)}{p} = b_0^* \left[ \frac{1}{p} - \frac{T_1^2}{(T_1 - T_2)(T_1 p + 1)} + \frac{T_2^2}{(T_1 - T_2)(T_2 p + 1)} \right] \quad (17)$$

Математичну модель завади, яка діє на виході апаратних засобів обробки сигналу швидкості, подано у вигляді гармонійного лінійного випадкового процесу. Визначено його характеристики та на основі їхнього аналізу встановлено коректність моделі. В основу розробки пристрою цифрової обробки сигналу швидкості обертання ШК покладено метод його синтезу з використанням еталонної моделі апаратних засобів та квадратичного критерію якості. Закон програмного завдання апаратними засобами швидкості обертання ШК сформульовано у такому вигляді [4]

$$A(z^{-1})y_t = z^{-3}B(z^{-1})u_t + C(z^{-1})G_t \quad (18)$$

де  $A(z^{-1}) = 1 - a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}$ ,  $B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1}$ ,  $C(z^{-1}) = c_0 + c_1 z^{-1}$  – ступеневі поліноми.

На основі виразу (18) процес обробки вхідного сигналу апаратними засобами набуває такого вигляду

$$C(z^{-1})y_t^* = F(z^{-1})y_t + D(z^{-1})u_t + H(z^{-1})G_t + \delta = 0 \quad (19)$$

де  $y_t^*$  – функція якості,  $\delta$  – дрейф вихідного сигналу,  $C(z^{-1})$ ,  $F(z^{-1})$ ,  $D(z^{-1})$ ,  $H(z^{-1})$  – ступеневі поліноми.

Визначимо параметри узагальненої функції якості та ступеневих поліномів. Для нашого випадку маємо

$$F(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1}) - E(z^{-1})A(z^{-1})}{z^{-3}} \quad (20)$$

Оберемо структуру ступеневого поліному  $E(z^{-1})$ , який має порядок  $d-1=2$ . Відповідно, маємо

$$E(z^{-1}) = 1 + e_1 z^{-1} + e_2 z^{-2}. \quad (21)$$

Параметри поліному  $E(z^{-1})$  обираємо в такому вигляді

$$E(z^{-1}) = c_0 + (a_1 c_0 - c_1) z^{-1} - (a_1 c_1 - a_1^2 c_0 + a_2 c_0) z^{-2}. \quad (22)$$

Після перетворень маємо

$$F(z^{-1}) = (-a_1^2 c_1 + a_1^3 c_0 - a_2 c_1) - a_2 (a_1 c_1 - a_1^2 c_0 + a_2 c_0) z^{-1}. \quad (23)$$

Параметри ступеневого поліному  $G(z^{-1})$  визначаються на підставі виразу

$$G(z^{-1}) = E(z^{-1}) B(z^{-1})$$

шляхом підстановки у нього рівнянь (18) та (22). Після перетворень маємо

$$G(z^{-1}) = b_0 c_0 + [b_1 c_0 + b_0 (a_1 c_0 - c_1)] z^{-1} + [b_1 (a_1 c_0 - c_1) - b_0 (a_1 c_1 - a_1^2 c_0 + a_2 c_0)] z^{-2} - b_1 (a_1 c_1 - a_1^2 c_0 + a_2 c_0) z^{-3}. \quad (24)$$

Для визначення параметрів поліномів  $F$ ,  $D$ ,  $H$  ступеневий поліном  $F(z^{-1})$  подаємо у вигляді

$$F(z^{-1}) = P_2 F'(z^{-1}) = P_2 (-a_1^2 c_1 + a_1^3 c_0 - a_2 c_1) - a_2 P_2 (a_1 c_1 - a_1^2 c_0 + a_2 c_0) z^{-1} = f_0 + f_1 z^{-1}. \quad (25)$$

Для визначення параметрів поліному  $D(z^{-1})$  застосовуємо вираз (4.98) роботи [5]. Після перетворень маємо

$$D(z^{-1}) = (b_0 c_0 P_2 + \lambda c_0) + [b_1 c_0 + b_0 (a_1 c_0 - c_1) - \lambda (c_0 + c_1)] z^{-1} + [b_1 (a_1 c_0 - c_1) - b_0 (a_1 c_1 - a_1^2 c_0 + a_2 c_0) + \lambda c_1] z^{-2} - b_1 (a_1 c_1 - a_1^2 c_0 + a_2 c_0) z^{-3} = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + g_3 z^{-3}. \quad (26)$$

Ступеневий поліном  $H(z^{-1})$  визначимо за допомогою (4.99) роботи [5] шляхом підстановки у нього рівняння (17)

$$H(z^{-1}) = -c_0 R_2 + c_1 R_2 z^{-1} = h_0 + h_1 z^{-1}. \quad (27)$$

Дрейф нуля вихідного сигналу пристрою обробки визначено за допомогою виразу (4.90) роботи [5]. Після підстановки у нього рівняння (18) маємо

$$\delta = (c_0 - c_1 + a_1 c_0 - a_1 c_1 + a_1^2 c_0 - a_2 c_0) \eta. \quad (28)$$

Таким чином, ми визначили вигляд та структуру ступеневих поліномів  $E(z^{-1})$ ,  $D(z^{-1})$ ,  $H(z^{-1})$ , а також можливу похибку обробки вхідного сигналу апаратними засобами обробки сигналу швидкості обертання ШК. У результаті перетворень встановлено параметри цих ступеневих поліномів

$$\begin{aligned} f_0 &= P_2 (-a_1^2 c_1 + a_1^3 c_0 - a_2 c_1), & f_1 &= a_2 P_2 (a_1^2 c_0 - a_1 c_1 - a_2 c_0), \\ g_0 &= b_0 c_0 P_2 + \lambda c_0, & g_1 &= b_1 c_0 + b_0 (a_1 c_0 - c_1) - \lambda (c_0 + c_1), \\ g_2 &= b_1 (a_1 c_0 - c_1) - b_0 (a_1 c_1 - a_1^2 c_0 + a_2 c_0) + \lambda c_1, \\ g_3 &= b_1 (a_1^2 c_0 - a_1 c_1 - a_2 c_0), & h_0 &= -c_0 R_2, & h_1 &= c_1 R_2; \\ \delta &= (c_0 - c_1 + a_1 c_0 - a_1 c_1 + a_1^2 c_0 - a_2 c_0) \eta. \end{aligned} \quad (29)$$

Процедуру обробки інформації апаратними засобами розроблено на основі принципу управління за відхиленням та подано в такому вигляді [2]

$$C(z^{-1}) y_t^* = f_0 y_t + f_1 y_{t-1} + g_0 u_t + g_1 u_{t-1} + g_2 u_{t-2} + g_3 u_{t-3} + h_0 G_t + h_1 G_{t-1} + \delta = 0, \quad (30)$$

де  $\delta$  – припустиме значення похибки апаратних засобів.

У результаті математичних перетворень останнього виразу отримано сигнал, який формує пристрій обробки сигналу швидкості обертання ШК на ВМ в кожний період дискретизації [2]

$$u_t = -g_0^{-1} (f_0 y_t + f_1 y_{t-1} + g_1 u_{t-1} + g_2 u_{t-2} + g_3 u_{t-3} + h_0 G_t + h_1 G_{t-1} + \delta).$$

Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі апаратних засобів отримана передатна функція пристрою обробки сигналу швидкості в такому вигляді [3]

$$W_9(z) = 1.206 \frac{z^2 - 0.1706z}{z^2 - 0.995z - 5.019 \cdot 10^{-3}}. \quad (31)$$

На основі виразів (17) та (32) розроблено схему комп'ютерного моделювання процесу обробки апаратними засобами ІВС сигналу швидкості обертання ШК (рис. 5). Отримано сигнали кугової швидкості обертання круга та струму обмотки збудження двигуна у функції часу.

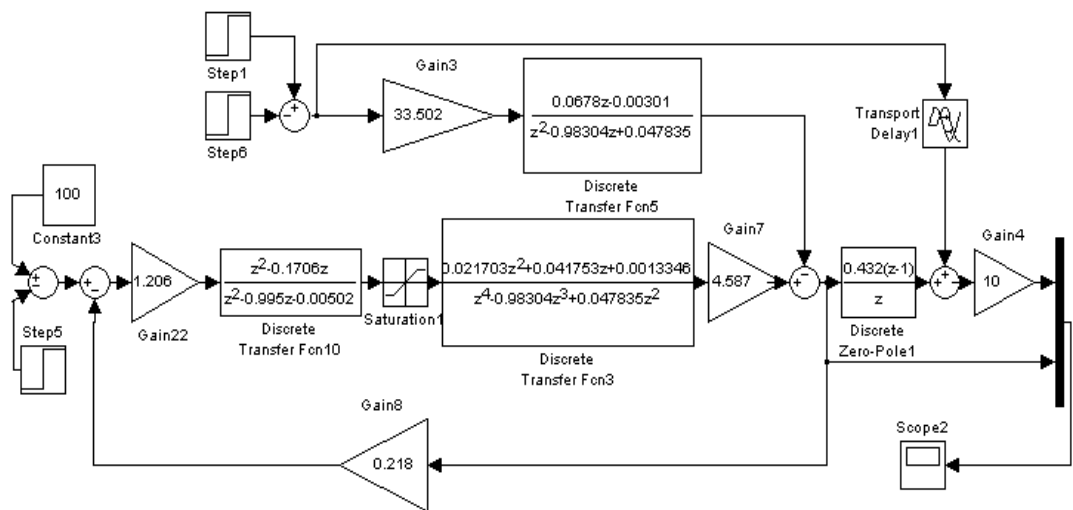


Рис. 5 – Схема комп'ютерного моделювання процесу обробки сигналу швидкості обертання ШК

**Висновок.** На основі математичної моделі виконуючого механізму розроблено аналогову систему та у результаті статистичної обробки дослідних даних з використанням інформаційного підходу встановлено її швидкісну похибку. При синтезі пристрою обробки сигналу швидкості обертання шліфувального круга використано дискретне з-перетворення, квадратичний критерій якості, запізнення апаратних засобів та завада у вигляді гармонійного лінійного випадкового процесу. Побудовано схему комп'ютерного моделювання процесу обробки сигналу швидкості обертання шліфувального круга. Встановлено, що точність та швидкодія апаратних засобів задовольняють встановленим вимогам.

#### Список литературы

1. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с.
2. Єнікєєв О.Ф. Оптимальний цифровий регулятор привода обертання шліфувального круга / О.Ф.Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, І.С. Зиков, Л.О. Шищенко // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2007. – №17. – С. 91 – 98.
3. Еникеев А.Ф. Анализ эффективности аппаратных средств управления поперечной подачей шлифовального круга / А.Ф. Еникеев, Ф.М. Євсюкова, Л.А. Шищенко // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2015. – № 4. – С. 132 – 137.

4. Єнікєєв О.Ф. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: №57, 2008. – С. 87–93.
5. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977. – 320 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Yenikieiev A.F. *Optimalnoe upravlenie tehnologicheskim processom almaznogo shlifovaniya*. [Optmal management by the technological process of the diamond polishing.] – Kramatorsk: DGMA, 2001. – 160 p.
2. Yenikieiev A.F., Yevsiukova F.M., Zikov I.S., Shushenko L.A. *Optymalniy tsyfrovyy regulator pryvoda obertannia shlifivalnoho kruga* [Optimal digital regulator of occasion of rotation of polishing of circle.] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2007, no. 17, pp. 91-98.
3. Yenikieiev A.F., Yevsiukova F.M., Shushenko L.A. *Analiz effektivnosti apparatnihs redstv upravleniyapoperechnopodachej shlifovalnogo kruga* [The analysis of the efficiency of hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 4, pp. 132-137.
4. Yenikieiev A.F., Zikov I.S. *SynteZ tsyfrovoho rehuliyatora poperechnoi peredachi shlifivalnoho kruga* [Synthesis of digital regulator of transversal transmission of the grinding circle] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008, no. 57, pp. 87-93.
5. Butkovskiy A.G. *Structural theories raspredelenukh system*. – Moscow, Nauka, 1977. – 320

Поступила (received) 21.11.2016

#### Бібліографічні описи /Библиографические описания /Bibliographic descriptions

**Аналіз ефективності апаратних засобів програмного задавання швидкості обертання шліфувального круга / О.Ф. Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, О.Ю. Приходько** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 112–116. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

**Анализ эффективности аппаратных средств программного задания скорости вращения шлифовального круга/ А.Ф. Еникеев, Ф.М. Евсюкова, О.Ю. Приходько** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 112–116. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.

**Analysis of efficiency of vehicle facilities of programmatic task of speed of rotation of diamond-impregnated / A. Yenikieiev, F. Yevsiukova, O. Prihodko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.112–116. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

#### Відомості про авторів /Сведения об авторах /About the Authors

**Єнікєєв Олександр Фанилович** – док. техн. наук, доцент, УкрДУЗТ, м. Харків, тел.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, e-mail: [Al\\_enikeev@bigmir.net](mailto:Al_enikeev@bigmir.net)

**Еникеев Александр Фанилович** – док. техн. наук, доцент, УкрГУЖТ, г. Харьков, тел.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, e-mail: [Al\\_enikeev@bigmir.net](mailto:Al_enikeev@bigmir.net)

**Yenikieiev Aleksandr** – doctor of technical sciences, reader, reader Ukrainian State University of Railway Transport, tel.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, e-mail: [Al\\_enikeev@bigmir.net](mailto:Al_enikeev@bigmir.net)

**Євсюкова Фатима Магомєтбїєвна** - Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; e-mail: [evsyukova\\_fatima@mail.ru](mailto:evsyukova_fatima@mail.ru); м. Харків.

**Евсюкова Фатима Магомєтбїєвна** - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299, e-mail: [evsyukova\\_fatima@mail.ru](mailto:evsyukova_fatima@mail.ru); г. Харьков.

**Yevsiukova Fatyma Magometbiyevna** - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute";, **Senior Lecturer** at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (057)-720-66-25, +380979412299, e-mail: [evsyukova\\_fatima@mail.ru](mailto:evsyukova_fatima@mail.ru); Kharkov;

**Приходько Ольга Юрьївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів, м. Харків; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: [olmurakami@mail.ru](mailto:olmurakami@mail.ru);

**Приходько Ольга Юрьївна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры технологии машиностроения и металлорежущих станков, г. Харьков; тел.: (057)-720-66-25, e-mail: [olmurakami@mail.ru](mailto:olmurakami@mail.ru);

**Prihodko Olga Yuriyevna** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of engineering technology and machine tools; tel.: (057)-720-66-25, e-mail: [olmurakami@mail.ru](mailto:olmurakami@mail.ru).

УДК 621.002

**А. Р. РУЗМЕТОВ**

**ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДОВИХ ФУНКЦІЙ ПРИНАЛЕЖНОСТІ ВІДНОСИН В СТРУКТУРІ ПІДГОТОВЧОЇ ЧАСТИНИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЕРЕХОДІВ**

Пропонуються методи визначення складові функції приналежності значень відносин змінних величин, пов'язаних із просторовими маніпуляціями й переміщеннями елементів оснащення, які виробляються робітником при виконанні їм певної групи технологічних прийомів операції обробки різанням. Дані отримані в результаті нормування частини токарської операції. Зроблено висновки про методику формування найбільш ефективного варіанта структури допоміжного процесу.

**Ключові слова:** технологічний прийом, технологічне оснащення, нечіткі відносини, функція приналежності, алгоритм роботи.

Предлагаются методы определения составляющих функции принадлежности значений отношений переменных величин, связанных с пространственными манипуляциями и перемещениями элементов оснащения, которые производятся рабочим при выполнении им определенной группы технологических приемов операции обработки резанием. Данные получены в результате нормирования части токарной операции. Сделаны выводы о методике формирования наиболее эффективного варианта структуры вспомогательного процесса.

**Ключевые слова:** технологический прием, технологическое оснащение, нечеткие отношения, функция принадлежности, алгоритм работы.

There have been proposed methods of syntheses of the detailed structure of the processes of the service technological complex by main workers with provision for probability of the successful realization technological receptions the work in determined organizing-technological conditions of process of manual operation. It Is produced searching of the components of membership functions importances the variable values of relations, associated with the spatial manipulates and moving of rig elements, which are executed the main working when him performing of groups of processing methods of cutting operation that has been set. The research results can more accurately describe the structure of the auxiliary process, used to optimize the set of equipping of and synchronize the operation of automated production modules. Data obtained as a result of the rationing of the turning operation. Conclusions are drawn on the effectiveness of formation method of auxiliary process structure variants of depending on the tensions of wor.

**Keywords:** technological reception, technological rig, fuzzy relations, membership function, algorithm of work.

**Вступ.** Процеси обслуговування технологічних комплексів основними робітниками, є джерелом значної невизначеності при плануванні черговості і партійності запуску деталей на обробку для конкретної виробничої ділянки. При виконанні цих функцій робітникові необхідно дотримуватися відповідних характеристик режиму роботи обладнання, стану об'єкта виробництва, та організаційного оснащення. В ході синтезу, детальної структури робочого процесу, системі потрібно орієнтуватися на однотипні відносини, які приведені до різних елементів технологічної системи, що динамічно змінюються в умовах проведення технологічної операції.

Якщо множина елементів технологічного прийому реалізуються відповідно до технічної інструкції, то вибір і впорядкування мікроелементів забезпечення  $(MS_{jp}^{jo})_{jp}$  повинні регламентуватися показником ступеня важливості виконання мікроелементів  $(Ext_{jme}^{ifa})$ . Цей показник повинно розраховувати на основі обліку характеристик умов його виконання, які входять у формулу визначення тривалості його виконання.

$$\left\{ \begin{aligned} (SFA_{ifs}^{ip})_{ifs} &= \left\{ (Sfa_{ifs}^{its})_{ifa} : ts_{its}, P_{ifa-1,ifa}^{its,ifs} (TO_{ifa-1}, TO_{ifa}) \right\} \\ (OFR_{ifs}^{ip})_{ifs} &= \left\{ (Ofr_{ifs}^{its})_{jfr} : ts_{its}, P_{jfr-1,jfr}^{its,ifs} (TO_{jfr-1}, TO_{jfr}) \right\} \\ (MS_{jp}^{jo})_{jp} &= \left\{ me_{jme}^{ip} : \left[ (Sfa_{ifs}^{its})_{ifa}, Ext_{jme}^{ifa} (U_{its,ifa}^{jp}, \Delta\Phi_{ifa,jme}^{its}) \right] \right. \\ &\quad \left. \left[ (Ofr_{ifs}^{its})_{jfr}, Ext_{jme}^{jfr} (U_{its,jfr}^{jp}, \Delta\Phi_{jfr,jme}^{its}) \right] \right\} \end{aligned} \right. , (1)$$

де  $P_{ifa-1,ifa}^{its,ifs} (TO_{ifa-1}, TO_{ifa})$  - емпіричний принцип фазової зміни параметрів груп термодогічних відносин;  $SFA_{ifs}^{ip}$  - множина фаз функціональної активізації засобів оснащення;  $ts_{its}$  - елемент технологічного

оснащення ( $its = 1, nts$  - множина засобів технологічного оснащення й функціональних ланок виконавця);  $TO_{ifa-1} = \left\{ (O_{ifa-1}^{its})_{io1} \right\}$ ,  $TO_{ifa} = \left\{ (O_{ifa}^{its})_{io2} \right\}$  - групи термодогічних відносин на  $ifa-1$  й  $ifa$ -ої фазах функціональної активізації відповідно;  $(OFR_{ifs}^{ip})_{ifs}$  - множина фаз організаційного відновлення після застосування засобів технологічного оснащення;  $(MS_{jp}^{jo})_{jp}$  - множина мікроелементів процесу фазового перетворення.

При виборі й упорядкуванні проміжних технологічних підзадач використаний метод нечітких редуційних мережних моделей (НРС).

$$HPC_{jp,jtp} = \left\{ (MS_{jp}^{jo})_{jp}, E_{jtp} \right\}, (2)$$

де  $jtp = 1..ntp^{ip}$  - множина технологічних прийомів, які складають  $jp$ -ий перехід;

$E^{jp} = \left\{ Ext_{jme}^{ifa} (U_{its,ifa}^{jp}, \Delta\Phi_{ifa,jme}^{its}) \right\}$  - множина відносин, які зв'язують ці роботи (причинно-наслідковий зв'язок, доцільність реалізації, доступність реалізації);

$Ext_{jtp}^{jp}$  - важливість виконання  $jp$ -ої роботи за для досягнення цілей  $j$ -го переходу

$$Ext_{jme}^{ifa} = \left( \begin{aligned} U_{its,ifa}^{jme} & \text{ if } U_{its,ifa}^{jme} > U_{its,ifa}^{\min} \text{ else } 0 \\ \Delta\Phi_{its,ifa}^{jme} & \text{ if } \Delta\Phi_{its,ifa}^{jme} > \Delta\Phi_{its,ifa}^{\min} \text{ else } 0 \end{aligned} \right), (3)$$

Як приклад, на рисунку 1 показаний ріст редуційної мережі відповідно до формулювання: «Установити, закріпити деталь у пристосуванні». Доцільність реалізації  $jme$ -го мікроелемента характеризує рівень функціональної ідентичності розглянутого мікроелемента на предмет подібності груп термодогічних відносин на  $ifa-1$  і  $ifa$ -ій фазах функціональної акти-

візації відповідно, стосовно до умов реалізації *jtp*-го технологічного прийому.

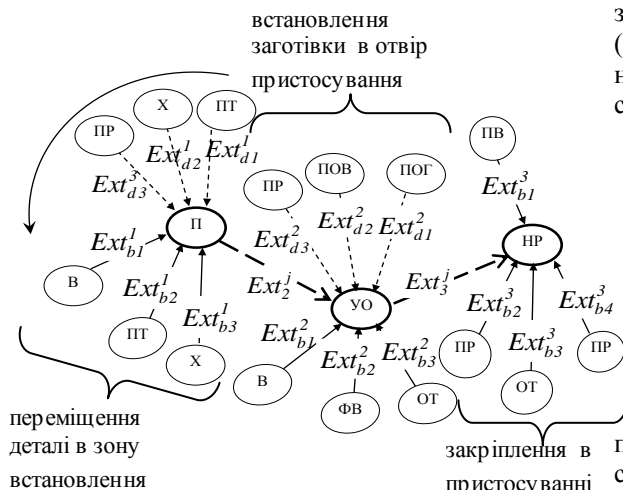


Рис. 1 – Структура нечіткої редукційної мережі допоміжного переходу «Установити, закріпити деталь у пристосуванні»:

де “→” позначення зв’язку з виконавчими мікроелементами (крона); “--→” позначення зв’язку з підготовчими мікроелементами (корінь); “-.-→” позначення зв’язку між істотними для переходу підзадачами; “↪” позначення порядку проходження мікроелементів у всіх вузлах мережі (відповідно до порядку убывання величин їхніх ступенів важливості виконання мікроелементів ( $Ext_d^r$  і  $Ext_b^r$ )) щодо рішення кожної технологічної підзадачі); PR, PT, X, POV, ПОГ, ФВ та ін. - допоміжні мікроелементи рухів виконавця

Для цих цілей має сенс використати модель нечітких відносин, у яких вид функції приналежності є залежністю від параметрів характеристик допоміжного інструмента, пристосування, елементів управління верстатом, засобів контролю, поверхонь базування, закріплення, обробки, організації робочого місця, напруженості робочого процесу.

$$\Delta\Phi_{jfa,jme}^{its} = \sum_{jfa=1}^{nfa} \sum_{io=1}^{no_{io}^{its}} \delta\left(\left(\mu\left(\left(b_{jfa}^{its}\right)_{io}\right), Lp_{v1}^{io}\right), \left(\mu\left(\left(b_{io}^{jme}\right), Lp_{v2}^{io}\right)\right)\right), \quad (4)$$

де  $\delta\left(\left(\mu\left(\left(b_{jfa}^{its}\right)_{io}\right), Lp_{v1}^{io}\right), \left(\mu\left(\left(b_{io}^{jme}\right), Lp_{v2}^{io}\right)\right)\right)$  – характеристика ступеня близькості значень  $io$ -ої відносини  $its$ -го елемента оснащення на  $ifa$ -ої фазі технологічної активізації, яка обчислюється на підставі виразу (5);  $Lp_{v1}^{io}$ ,  $Lp_{v2}^{io}$  – лінгвістичні змінні (терми)  $io$ -ої відносини з номерами  $v1$  й  $v2$  (для  $S^T:Lp^{S^T} = \{ \text{"непосредственно"}, \text{"очень близко"}, \text{"близко"}, \text{"далеко"} \}$  – терм-множина відносини «Відстань між суб'єктом і об'єктом у горизонтальній площині»).

Доступність реалізації являє собою функцію рівня доступу виконавця (рук, корпусу й ін.) або засобів технічного оснащення від коефіцієнтів, що характеризують ступінь контролю (СК), ступінь обережності (ОС), ступінь щільності з'єднання (СП), ступінь стиснення при виконанні мікроелемента (СТ), необхідна ступінь орієнтування (ОР) і ступінь зручності (СУ).

$$\delta\left(\left(\mu\left(\left(b_{jfa}^{its}\right)_{io}\right), Lp_{v1}^{io}\right), \left(\mu\left(\left(b_{io}^{jme}\right), Lp_{v2}^{io}\right)\right)\right) = \begin{cases} 1, & \\ 0, & \end{cases} \left\{ \begin{array}{l} \min \left[ \max \left( \mu \left( \left( b_{jfa}^{its} \right)_{io} \right), 1 - \mu \left( b_{io}^{jme} \right) \right), \right. \\ \left. \max \left( \mu \left( b_{io}^{jme} \right), 1 - \mu \left( \left( b_{jfa}^{its} \right)_{io} \right) \right) \right] \text{ if } \left[ (v1 = v2) \cap \left| \mu \left( \left( b_{jfa}^{its} \right)_{io} \right) - \mu \left( b_{io}^{jme} \right) \right| \leq \mu_0 \right], \right. \\ \left. \text{ if } \left[ (v1 = v2) \cap \left| \mu \left( \left( b_{jfa}^{its} \right)_{io} \right) - \mu \left( b_{io}^{jme} \right) \right| > \mu_0 \right], \right. \\ \left. \text{ if } (v1 \neq v2) \right\}, \quad (5)$$

Значення цих коефіцієнтів можна визначити на підставі методики, представленої в [3]. Одним зі способів визначення рівня доступності реалізації є узяття добутку зі значень всіх коефіцієнтів, що відповідають даному мікроелементу:

$$U_{its,jfa}^{jtp} = \prod_{ikm=1}^{nkm} \left( K_{jme}^{its,jfa} \right)_{ikm}, \quad (6)$$

де  $\left( K_{jme}^{its,jfa} \right)_{ikm}$  -  $ikm$ -й коефіцієнт доступності, що відповідає  $jme$ -ому мікроелементу при реалізації  $jfa$ -ої фази функціональної активізації  $its$ -ого засобу технологічного оснащення;  $ikm = 1, nkm$  - множина коефіцієнтів доступності:

$$\left( K_{jme}^{its,jfa} \right)_{ikm} = f \left( CK_{its,jfa}^{jtp}, OC_{its,jfa}^{jtp}, СП_{its,jfa}^{jtp}, СТ_{its,jfa}^{jtp}, ОР_{its,jfa}^{jtp}, СУ_{its,jfa}^{jtp} \right), \quad (7)$$

Постійно змінювана, широка номенклатура оброблюваних деталей в умовах одиничного й дрібно-серійного виробництва припускає широке застосування універсальних засобів: починаючи від обладнання й закінчуючи засобами контролю. Їхнє застосування вимагає залучення значної кількості підготовчих прийомів. У результаті, час, безпосередньо не пов'язаний з обробкою деталі, становить більшу частину робочого циклу. Безумовно, ці витрати знижуються завдяки відносній стабілізації робочого циклу виготовлення партії окремих деталей і адаптаційним здатностям робітника, але незначно. Занадто мала величина партій деталей що обробляються змушує робітника перебувати в режимі постійної адаптації до змінюваних технологічних процесів, обробки.

Кожний елемент технологічної системи (виконавчі підсистеми, підсистеми керування обладнанням, кріпильні пристосування, ріжучий інструмент, допоміжні і контрольно-вимірвальні інструменти та прилади), в певних організаційно-технологічних умовах робочого місця, має на увазі деякий алгоритм роботи з ним. Тобто робітник повинен постійно не тільки прикладати зусилля по переміщенню або закріпленню деталі, елементів оснащення, вмиканню-вимиканню обладнання, але і вирішувати завдання розпізнавання виробничих ситуацій і вибору методів роботи. Невизначеність процесу МРТО в будь-який момент часу

пов'язана зі складністю його орієнтування серед об'єктів уваги, що вимагають пошуку рішення по зміні їхніх властивостей. Тому швидкість рішення підзадач допоміжного переходу залежить від часу ідентифікації ознак або властивостей об'єктів робочого місця у зв'язку з робочою мікроситуацією. По мірі інформаційної обробки елементів уваги, збільшується інформаційна напруга робітника, у наслідок чого, знижується швидкість рішення технологічних підзадач.

Зазначені обставини висувають завдання вдосконалення процесу проектування структури машиноручних технологічних операцій з метою підвищення їхньої продуктивності за рахунок створення програмних комплексів імітаційного моделювання допоміжних прийомів технологічних операцій на рівні мікроструктури, які враховують інформаційну напруженість робітника.

**Мета роботи** – визначення ймовірності успішної реалізації мікроелементних комплексів, що відповідають технологічним прийомам роботи в певних організаційно-технологічних умовах, і приведення цієї залежності до фіксованої множини функцій приналежності, що представлені термами відносин між елементами технологічної системи.

**Загальна методика досліджень.** Дослідження виконані на основі сучасної уяви про процес проектування технологічних операцій, системного аналізу технологічних особливостей певного технологічного процесу.

Проаналізовано ряд функцій, які виконуються основними робітниками у виробничих умовах, серед яких: розпізнавання методів обробки ( $F_{мет.}$ ), керування технологічною системою при забезпеченні обробки ( $F_{упр.}$ ), забезпечення стабільності і точності виконавчих параметрів обробки ( $F_{заб.точн.}$ ), контроль результатів роботи технологічної системи ( $F_{конт.}$ ).

Успішному виконанню переходів відповідає стан технологічної системи з дотриманням відхилень ви-

конавчих параметрів деталі та параметрів характеристик верстата і оснащення, в припустимих межах працездатності технологічної системи на достатньо продуктивному та якісному рівні.

Дослідженню були піддані прийоми по установці й закріпленню деталі типу "вал східчастий" зі співвідношенням діаметра до довжини в діапазоні: 0,65–0,80 з більшим габаритом 150–250 мм при базуванні в трикулачковому патроні по меншому діаметрі і торцю більшого діаметра. А також при контролі обробленого діаметра з точністю до 0,1 мм штангенциркулем на верстаті при показнику напруженості роботи 2–3. При збільшенні параметра напруженості спостерігався ріст помилкових рухів, що приводить до руйнування структури технологічного прийому.

Результатом досліджень є залежність вірогідності успішної реалізації технологічних переходів від, вказаних вище, параметрів:

$$p_{jp}^{op} = f \left( X_{осн.}^{осн.}, X_{ст.}^{ст.}, X_{jp}^{\partial}, X_{jp-1}^{\partial}, X_{jp}^{\partial, мехн.}, \frac{Nd_{jo}}{t_{jo}^{lim}} \right), \quad (8)$$

При фіксованих умовах ( $X_{осн.}^{осн.}, X_{ст.}^{ст.}, X_{jp}^{\partial}, X_{jp-1}^{\partial}, X_{jp}^{\partial, мехн.} = const$ ) ця залежність характеризує рівень помилковості виконання переходів при зміні рівня напруженості проведення технологічної операції (при зменшенні обсягу часу на обробку деякої кількості деталей).

При використанні методів статистичних досліджень з врахуванням експертних оцінок, в рамках САПР ТП заснованих на принципах імітаційного моделювання досліджено вплив групи факторів на основі відносин "S", "YR" для технологічних прийомів, до складу яких входять мікроелементи роботи УО, УП або УР для ряду виробничих ситуацій.

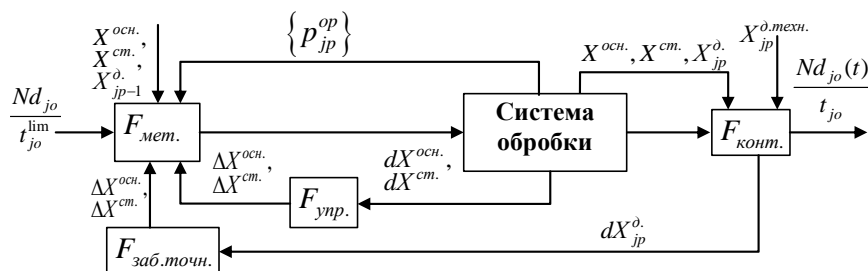


Рис. 2 – Схема системи управління системою обробки:

де  $\frac{Nd_{jo}}{t_{jo}^{lim}}$ ,  $\frac{Nd_{jo}(t)}{t_{jo}}$  – запланована та фактична швидкості обробки для  $jo$ -ої операції відповідно, які розраховуються як відношення загальної кількості деталей для обробки та фактично оброблених ( $Nd_{jo}$ ,  $Nd_{jo}(t)$ ) до часу їх обробки ( $t_{jo}^{lim}$  – за планом,  $t_{jo}$  – фактично);  $X^{осн.}, X^{ст.}$  – характеристики верстата і оснащення відповідно,  $X_{jp-1}^{\partial}, X_{jp}^{\partial}, X_{jp}^{\partial, мехн.}$  – характеристики заготовки, деталі та технологічні умови на  $jp$ -ому переході відповідно;  $\{p_{jp}^{op}\}$  – множина вірогідностей успішного виконання технологічних переходів;  $dX_{осн.}, dX_{ст.}, dX_{jp}^{\partial}$  – фактичні зміни та зміни характеристик верстата і оснащення в наслідок управління технологічною системою відповідно;  $dX_{jp}^{\partial}$  – відхилення фактичних виконавчих параметрів деталі від технологічних вимог

На основі знайдених залежностей, при орієнтуванні на інтегративні параметри (співвідношення площин на окремих рівнях графіка) та оптимальні значення базової змінної ( $b_{opt}$ ) досліджуваних відносин (див. рис. 2), перераховані показники чіткості границь та величини ядра функції приналежності функції приналежності (8) [3] для певного ряду інтервальних змінних.

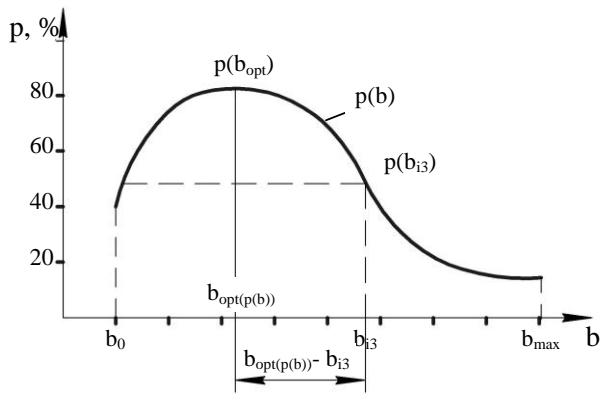


Рис. 3 – Типовий графік залежності вірогідності успішного виконання підготовчої частини переходів від базової змінної  $b$

$$\left\{ \begin{aligned} (z_{i3}^{io})_{\text{пр}} &= 2 \cdot \text{ceil} \left( \frac{N_{m_{i3}^p} \int_{b_0}^{b_{\text{opt}}} p_{\text{пр}}(b) db - \int_{b_0}^{b_{i3}} (p_{\text{пр}}(b) - p_{\text{пр}}(b_{i3})) db}{N_{m_{i3}^p} \int_{b_0}^{b_{\text{opt}}} p_{\text{пр}}(b) db} \right), \\ (z_{i3}^{io})_{\text{пр}} &= \frac{1}{n^{\text{об}}} \sum_{i=1}^n \mu(b_{i3}) \frac{b_{i3}}{|b_{i3} - b_{\text{opt}(p_{\text{пр}}(b))}|} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Знайдені функції приналежності дозволяють гарантувати певний рівень надійності відпрацювання синтезованих структур технологічних прийомів роботи при достатній швидкості виконання допоміжної частини переходу.

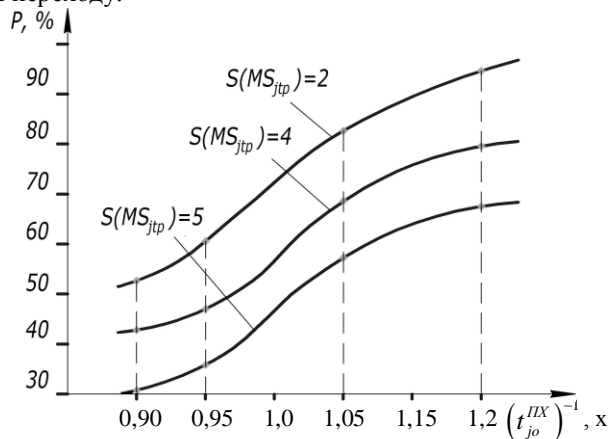


Рис. 4 – Графік залежності вірогідності успішного виконання підготовчої частини переходів від швидкості реалізації груп прийомів роботи для приведених значень напруженості проведення технологічної операції.

Розроблені загальні принципи оптимізації структури і параметрів допоміжної частини операційного

технологічного процесу, виконуваного на автоматизованому металорізальному обладнанні, що дозволяють підвищити ефективність за рахунок визначення більш оптимального рівня інформаційної напруженості робітника, зниження витрат допоміжного часу завдяки обраної структури операційного технологічного процесу.

**Висновки.** Досліджені та формалізовані залежності вірогідності успішної реалізації технологічних прийомів від значень параметрів відносин між однотипними характеристиками елементів верстатної системи та оснащення.

На підставі математичних моделей і отриманих закономірностей розроблена методика формування структур технічно відтворюємих машино-ручних технологічних операцій, що дозволяє, одержувати найбільш ефективний варіант на етапі проектування структури допоміжного процесу.

По запропонованим вище методиках і математичній моделі оптимізаційного синтезу допоміжної частини переходів технологічної операції розроблений блок інформаційного й алгоритмічного забезпечення САПР ТП.

**Список літератури**

1. Бочкарев П.Ю., Васин А.Н. Планирование технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Теоретические основы разработки подсистем планирования маршрутов технологических процессов: Учеб. пособие. Кн. 1 Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. 136 с.
2. Базовая система микроэлементных нормативов времени (БСМ-1). Нормативно производственное издание / под. ред. С. А. Юровского. — Москва: Экономика. — 1989. — 122 с.
3. Рузметов А.Р. Методика визначення функцій приналежності в системі проектування мікроструктури технологічного переходу / А.Р. Рузметов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — Харків: НТУ «ХПІ». — 2014. — № 42 (1085). — С. 139 – 147.
4. Рузметов А.Р. Оптимізація допоміжного процесу механічної обробки різанням з урахуванням організаційно технологічних витрат / А.Р. Рузметов // Технологічний аудит та резерви виробництва. — 2015. — № 4/1 (24). — С. 77 – 83.
5. Рузметов А.Р. К вопросу о имитационном моделировании машино-ручных технологических операций в системах обработки металлов резанием / А.Н. Шелковой, Л.Б. Шрон, Г.И. Ищенко, А.Р. Рузметов, М.С. Семченко // Сучасні технології в машинобудуванні. — Харків: НТУ «ХПІ». — 2015 — №10. — С. 177 – 191.
6. Рузметов А.Р. Визначення оптимально потенціальної мікроструктури технологічних переходів. / А.Р. Рузметов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — Харків: НТУ «ХПІ». — 2007. — №1. — С. 44 – 49.
7. Рузметов А.Р. Методика адаптації типового допоміжного технологічного переходу до умов робітничого середовища. / А.Н. Шелковой, О.Ю. Приходько, А.Р. Рузметов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — Харків: НТУ «ХПІ». — 2008. — №4. — С. 156 – 160.
8. Рузметов А.Р. Подання трудового процесу у вигляді декларативних і процедурних знань семантичної мережі / О.М. Шелковий, А.Р. Рузметов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — Харків: НТУ «ХПІ». — 2005. — №39. — С.72 – 76.

**References (transliterated)**

1. Bochkarev P. Yu., Vasin A. N. Planirovanie texnologicheskix processov v usloviyax mnogonomenklaturnyx mexanoobrabatyvayushhix sistem. teoreticheskie osnovy razrabotki podsystem planirovaniya marshrutov texnologicheskix processov [Planning technological processes in multifunctional machining systems. The theoretical basis for the development of subsystems of technological design of



- routing processes]. Tutorial. Book №1. Saratov, Saratov *State Technical University* (SSTU), 2004. 136 p.
- 2 Yurovskiy S. A., ed. Bazovaya sistema mikroelementnykh normativov vremeni (bsm-1). normativno proizvodstvennoe izdanie [Basic system of microelement Normative of time (BSM-1). Normative manufacturing edition]. Moscow, Ekonomika Publ., 1989. 122 p.
  - 3 Ruzmetov A. R. Metodyka vyznachennya funkciy prynalezhnosti v systemi proektuvannya mikrostruktury` tehnologichnogo perexodu. [Method of determining membership functions in the system design process microstructure of Manufacturing step.]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 42 (1085), pp. 139–147.
  - 4 Ruzmetov A. R. Optyimizaciya dopomizhnogo procesu mexanichnoy obrobky` rizannyam z uraxuvannyam organizacijno tehnologichnyx vytrat [Optimization of supporting processes of machining taking into account organizational and technological costs] *Technology audit and production reserves* — № 4/1(24), 2015. pp. 77–83.
  - 5 Shron L. B., Ischenko G. I., Ruzmetov A. R., Semchenko M. S. K voprosu o imitacionnom modelirovaniy mashinno-ruchnyh tehnologicheskikh operaciy v sistemah obrabotki metallov rezaniem [To a question on simulation modeling of machine and manual technological operations in the systems of processing metals by cutting]. *Suchasni Tekhnologii v Mashynobuduvanni*. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 10, pp. 177–191.
  - 6 Ruzmetov A. R. Vyznachennya optymal'no potentsial'noy mikrostruktury tehnologichnykh perekhodiv. [Determining the potential optimum microstructure of technological steps]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2007, no. 1, pp. 44–49.
  - 7 Shelkovo A. N., Prihod'ko O. Yu., Ruzmetov A. R. (2008). Metodika adaptatsii tipovogo vspomogatel'nogo tehnologicheskogo perekoda k usloviyam rabochei sredy. [Method adaptation of a typical support technological step to the conditions of working environment]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008, no. 4, pp. 156–160.
  - 8 Ruzmetov A. R. Podannya trudovoho protsesu u vyhladi deklarativnykh i protsedurnykh znan' semantichnoy merezhi [Presentation of the labor process in the form of declarative and procedural knowledge of semantic networks]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2005, no. 39, pp. 72–76.

*Поступила (received) 05.11.2016*

### *Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Визначення складові функції приналежності відносин в структурі підготовчої частини технологічних переходів / А. Р. Рuzметов // Вісник НТУ «ХПІ».** Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 117–121. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.

**Определение составляющих функции принадлежности отношений в структуре подготовительной части технологических переходов / А. Р. Рuzметов // Вісник НТУ «ХПІ».** Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 117–121. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.

**Determination components of membership functions in the preparatory part structure of the technological step / A. R. Ruzmetov // Bulletin of NTU "KhPI".** Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.112–116. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

### *Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Андрій Русланович Рuzметов** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри Технології машинобудування та металорізальних верстатів, тел.:(057) 707-66-25; e-mail: arnzetg@gmail.com.

**Андрей Русланович Рuzметов** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры Технологии машиностроения и металлообработки станков, тел.:(057) 707- 66- 25; e- mail: arnzetg@gmail.com.

**Andrii Ruslanovych Ruzmetov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant at the Department of Manufacturing engineering and machine tools, tel.: (057) 707- 66- 25; e-mail: arnzetg@gmail.com.

УДК 621.717

**Я. І. ЧИБІРЯК, Є. В. КОНОПЛЯНЧЕНКО, В. В. НАГОРНИЙ****ІЄРАРХІЧНА СИСТЕМА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ СКЛАДАННЯ ВИРОБІВ**

У роботі розглянута одна з глобальних задач машинобудування – розробка ієрархічної системи математичного моделювання автоматичного складання об'єктів. Пропонуються нові принципи побудови математичних моделей техпроцесів, викладені наукові вишукування в цій області і подана послідовність автоматичного складання об'єктів, розроблена за допомогою ЕОМ.

**Ключові слова:** послідовність складання, математична модель, виробничий цикл, схема доступу, базова деталь, функціональне моделювання.

В работе рассмотрена одна из глобальных задач машиностроения - разработка иерархической системы математического моделирования автоматической сборки объектов. Предлагаются новые принципы построения математических моделей техпроцессов, изложены научные исследования в этой области и предложена последовательность автоматической сборки объектов, разработанная с помощью ЭВМ.

**Ключевые слова:** последовательность сборки, математическая модель, производственный цикл, схема доступа, базовая деталь, функциональное моделирование.

One of the main tasks of engineering industries are retooling of enterprises based on accelerating the introduction of scientific and technological progress. Assembly - the final and decisive stage of the production process, from which performance depends largely on the quality of machines. The complexity of assembly covers 25 ... 60% of the complexity of manufacturing products. Currently, about 25% mechanized and automated assembly is 6%. Continuous improvement and complexity of machine designs resulting in increased complexity, increased requirements for reliability and build quality. With the present level of automation should be involved in the assembly process a large number of highly qualified specialists. In this connection, automation assembly production dramatically increases productivity, technical level and quality of products and accelerates the solution of social problems. Low levels of assembly production can be explained as follows: perform assembly work requires high flexibility of technological equipment; no rational methodological basis for the creation of automated assembly systems, assembly not developed classification systems and principles of unification. If the scientific and technical literature some mechanization and automation of assembly operations, the issues related to classification and structure optimization of automated assembly technology systems, practically designed.

The paper considered one of the global problems of engineering - the development of a hierarchical system of mathematical modeling automated assembly facilities. Proposed new principles of construction of mathematical models of technical process set out scientific research in this field and given the sequence of automatic assembly of objects designed by computer.

Designed iterative method for determining the sequence assembly of products using computer technology allowed the design to reduce the sequence assembly of products, reduce the cost of their development, improve the quality of applied solutions. Reducing the institutions and positions in the preparation resulted in a reduction of the production cycle, which ultimately reduces the amount of working capital, accelerating their turnover, reduces the cost of the product.

**Keywords:** assembly sequence, mathematical model, production cycle, circuit access basic part, functional design.

**Вступ.** Однією з основних задач розвитку машинобудівних виробництв є технічне переозброєння підприємств на основі прискорення впровадження досягнень науково-технічного прогресу. Складання - заключний і визначальний етап виробничого процесу, від виконання якого в значній мірі залежить якість машин. Трудомісткість складання займає 25...60% від трудомісткості виготовлення виробів. В даний час механізовано близько 25%, а автоматизовано до 6% складальних робіт [1]. Постійне удосконалення і ускладнення конструкцій машин призводить до збільшення трудомісткості, підвищення вимог до надійності і якості складання. При сучасному рівні автоматизації необхідно залучати у складальне виробництво велику кількість висококваліфікованих спеціалістів. У цьому зв'язку автоматизація складального виробництва різко підвищує продуктивність праці, технічний рівень і якість продукції, що випускається, а також прискорює рішення соціальних проблем. Низький рівень розвитку складального виробництва можна пояснити таким чином: виконання складальних робіт потребує високої гнучкості засобів технологічного оснащення; відсутні методологічні основи створення раціональних автоматизованих складальних комплексів, не розроблені класифікації складальних систем і принципи їх уніфікації. Якщо в науково-технічній літературі зустрічаються окремі засоби механізації й автоматизації складальних операцій [2], то питання, пов'язані з класифікацією й оп-

тимізацією структур автоматизованих складальних технологічних систем, практично не розроблені.

**Аналіз літературних даних і постановка проблеми.** Технологічне проектування складальних робіт поділяється на два взаємозалежних етапи:

визначення послідовності складання елементів виробу;

проектування робочого технологічного процесу складання.

На першому етапі, що ставиться одночасно і до проектування технологічного процесу і до оснащення складання вирішуються такі задачі [1]:

вибір схеми базування елементів складальної одиниці;

вибір конструктивної схеми і складального пристрою;

вибір схеми ув'язки оснастки;

вибір можливих послідовностей установки елементів складальної одиниці з урахуванням умов базування і доступу в зону складання;

- вибір оптимальної послідовності установки елементів складальної одиниці.

На другому етапі вирішуються наступні задачі [1]:

- вибір складу і послідовності виконання операцій з'єднання, механічної обробки, герметизації, контролю і т.д. при заданій послідовності установки елементів складальної одиниці;

- вибір складу оснащення, інструменту, устаткування, допоміжних матеріалів;
- визначення складу і кваліфікації виконавців;
- розрахунок техніко-економічних показників і вибір оптимального варіанта технологічного процесу складання.

Синтез структури технологічного процесу здійснюється по табличним, сполучним і перестановочним моделям структури об'єкта [3]. Розрахунок техніко-економічних показників та інші розрахунки, пов'язані з вибором оптимальної структури, здійснюються по кількісним моделям [3, 4]. Всі моделі, що використовуються при синтезі структури об'єкта, являють собою єдину систему моделей, взаємопов'язаних через множину контурів об'єкта проектування.

Для побудови структурних моделей об'єкта проектування спочатку встановлюється склад властивостей (контурів), по яких можуть бути виділені елементи проектного об'єкта. Склад цих властивостей визначається, в першу чергу, цільовим призначенням об'єкта і функціями, що забезпечують виконання цільового призначення.

Далі виявляється природа відношень, що пов'язують елементи і їх контури (геометричні, кінематичні і т.п.) [3, 5]. На основі такого аналізу визначається можливий склад елементів проектного об'єкта і будується модель породжуючого середовища, в якій буде здійснюватися синтез цього об'єкта. Породжуюче середовище включає дані про предметну область, до якої належить об'єкт, про існуючі і розроблювальні структурні моделі об'єкта, відомі або прогнозовані відношення і зв'язки між елементами і властивостями об'єкта та зовнішнього середовища. На базі цих даних створюється математична модель, що охоплює ту інформацію про породжуюче середовище, що може бути формалізована і подана засобами системи моделювання [3].

Математичною моделлю  $S(A)$  об'єкта  $A$  в загальному випадку буде набір елементів:

$$S(A) = \{A, F, R\},$$

де  $A$  - множина елементів;

$F$  - множина контурів;

$R$  - множина відношень між елементами і контурами об'єкта  $A$ .

До складу контурів моделі входять, разом із властивостями елементів об'єкта, властивості, що характеризують взаємодію об'єкта з зовнішнім середовищем:  $F_{вх}$  - вхідні дані;  $F_{вих}$  - вихідні дані;  $F_{упр}$  - управляючі впливи;  $F_{зб}$  - збурюючі впливи.

Деякі елементи моделі  $S(A)$  в певних випадках можуть бути подані в неявному вигляді або узагалі відсутні. У останньому випадку відсутній елемент моделі представляється як порожня множина.

Модель  $S(A)$  породжуючого середовища служить для проектування об'єктів  $A_k$  із складом  $A_k \subseteq A$  елементів. Одна модель  $S(A)$  породжуючого середовища містить дані про множину  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$  проєктованих об'єктів.

Елементи реальної системи, будучи матеріальними об'єктами, володіють різнорідними, органічно взаємозалежними один з одним властивостями (зв'яз-

ками). Основними зв'язками є структурні і причинно-наслідкові зв'язки, а в залежності від природи впливів зовнішнього середовища - функціональні, дійсні, енергетичні, просторові і інформаційні [3].

Структурні зв'язки обумовлені відношеннями приналежності об'єктів, їх елементів і властивостей до визначених множин, відношеннями ієрархічної підпорядкованості, а також відношеннями інцидентності, суміжності і порядку.

Причинно-наслідкові зв'язки відображають послідовності зміни станів об'єкта з урахуванням стану інших, не обов'язково суміжних з ним об'єктів.

Функціональні зв'язки визначають взаємозв'язок між елементами і властивостями об'єкта, обумовлену виконуваними функціями на даному етапі життєвого циклу об'єкта. Всі функції і властивості об'єкта описуються через поняття контуру. На кількісному рівні контур  $F_i$  характеризується множиною параметрів, що мають визначені числові величини. На логічному рівні контур  $F_i$  визначається у вигляді логічної змінної  $F_i = 1$  або  $F_i = 0$ . Якщо  $F_i = 1$ , то кажуть, що контур реалізований або існує.

Дійсні зв'язки обумовлені фізичними і хімічними властивостями і відношеннями між ними в процесі функціонування об'єкта, енергетичні зв'язки характеризують енергетичну сторону функціонування об'єкта. Просторовий взаємозв'язок елементів об'єкта характеризує їх взаємне розташування, наявність механічних зв'язків і характер можливих рухів один відносно одного, або відносно даної системи відліку. Інформаційні зв'язки відображають інформаційні аспекти функціонування об'єкта.

У залежності від наявності відношень суміжності і порядку між елементами проектного об'єкта, всі моделі розділяються на сполучні і впорядковані.

Сполучні моделі застосовуються в тих випадках, коли визначається тільки склад елементів проектного об'єкта. Впорядковані моделі поділяються на табличні, сітьові, перестановочні і застосовуються в тих випадках, коли визначається склад і структурні відношення між елементами проектного об'єкта. При цьому моделювання може здійснюватися на таких рівнях [6, 7]: теоретико-множинному (методами теорії множин і теорії графів) і логічному (методами математичної логіки).

Прагнення забезпечити зручність установки і базування деталей на позиціях складання призвело до того, що в складальному устаткуванні тепер достатньо рідкісними є випадки, коли передача складальної одиниці з позиції на позицію супроводжувалася б зміною її установки. Частіше всього положення базової деталі від початку до кінця залишається незмінним [1, 8]. На жаль, дотепер, при побудові схем складання виробів не проводилося досліджень, пов'язаних із зменшенням кількості установок і позицій [10]. Скорочення кількості установок і позицій призводить до зменшення виробничого циклу [1]. З розміром виробничого циклу пов'язана сума оборотних коштів (незавершене виробництво), їх оборотність, розміри виробничих площ і, у кінцевому рахунку, собівартість виробу. Крім того, виробничий цикл може виступати в якості самостійного тимчасового критерію оцінки організації виробничого процесу [1].

Тому важливо проектування таких схем складальних процесів, при яких виробничий цикл був би мінімальним.

**Мета роботи і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка ітераційного процесу послідовності складання виробів.

На основі аналізу сучасної наукової проблематики в області структурного аналізу і раціонального синтезу процесів складання, у даній роботі передбачається рішення таких задач:

- розробка ієрархічної системи математичного моделювання послідовності складання виробів;
- розробити алгоритмічне та програмне забезпечення на основі розробленого методу.

**Результати досліджень.** Вхідною інформацією для побудови математичної моделі визначення послідовності складання виробу є схема виробу і технічні умови на його складання.

Вхідною інформацією для визначення послідовності складання виробу (ПСВ) є схема базування і доступу.

Для схеми базування і доступу розроблені правила, по яким вони задаються, з метою однозначності представлення даних:

Схема базування - матриця  $V[N][N]$ , де  $N$  - кількість деталей. Елемент матриці  $V[i][j]=1$ , якщо  $i$ -й елемент має можливість з'єднання з  $j$ -тим елементом і  $V[i][j]=0$  у протилежному випадку.

Схема доступу задається у вигляді матриці  $D[N][N]$ , де  $N$  - кількість деталей. Елемент матриці  $D[i][j]=1$ , якщо  $i$ -му елементу в складанні передують  $j$ -й елемент і  $D[i][j]=0$  у протилежному випадку.

Базові деталі задаються:

- а) нульовими рядками в схемі доступу:
  - якщо нульовий рядок має одна базова деталь, то саме з неї починається складання;
  - якщо нульові рядки мають кілька деталей, то складання їх може здійснюватися паралельно;
- б) не нульовими рядками в схемі доступу:  $D[i][j]=1$  у тому випадку, коли  $i$ -й базової деталі передують складання  $j$ -ї деталі, що у свою чергу також є базовою.

На всі інші деталі задається не більше двох обмежень.

Алгоритм рішення задачі складається з наступних етапів:

1. Першим етапом при побудові ПСВ є визначення базових деталей, що задаються технологом у схемі доступу. Розроблений алгоритм дозволяє виділяти базові деталі автоматично. На даному етапі здійснюється поділ виробу на складальні одиниці, так названі підзборки. Використовуючи схему базування, вибираємо деталі, що базуються по обраним базовим. На даному етапі здійснюється поділ виробу на складальні одиниці (СО).

2. Здійснюється процес ранжирування окремих СО з метою визначення послідовності їх входження у виріб. Використовується конструкторсько-технологічна інформація: маса, габаритні розміри базових деталей та ін.

3. За схемою доступу, визначаємо послідовність реалізації окремих СО. Усі деталі, що

базуються по визначеній базовій, приєднуються до неї у певній послідовності, що задається схемою доступу. Методом перебору і перестановки базовані деталі займають певні рівні стосовно базової деталі. На одному рівні може виявитися більше однієї деталі. Це говорить про можливість паралельного складання. На першому рівні завжди буде знаходитися базова деталь. Схема базування на даному етапі використовується для визначення можливих баз деталей і виведення послідовності складання деталей і складальних одиниць з указівкою базування.

4. Оцінка отриманих варіантів схем складання на раціональність по тривалості виробничого циклу за коефіцієнтом структурного виду [1].

За розробленим методом було створено програмний продукт мовою C++ для визначення послідовності складання виробів.

Інформаційна система розробленого програмного продукту складається з 4 модулів (рис. 1), які взаємопов'язані між собою та послідовно поетапно виконують опрацювання вхідних даних.



Рис. 1 – Структура програмного модуля

На етапі функціонального моделювання та описання процесів було обрано методологію SADT на основі нотації IDEF0 [9]. Основними особливостями використаної методології є акцент на ієрархічне представлення об'єктів, що спрощує розуміння предметної області та логічних зв'язків між процесами.

На рис. 2 представлено загальну функцію процесу побудови раціональної послідовності складання виробів в нотації IDEF0.

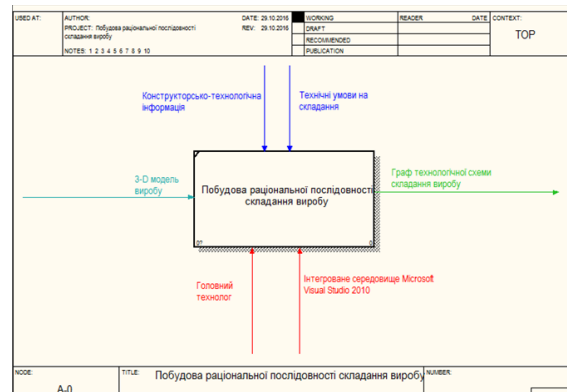


Рис. 2 – Контекстна діаграма «Побудова раціональної послідовності складання виробу»

Для кращого розуміння функціональних вимог загальну функцію було деталізовано. Результат декомпозиції на взаємопов'язані функціональні блоки представлено на рис. 3.

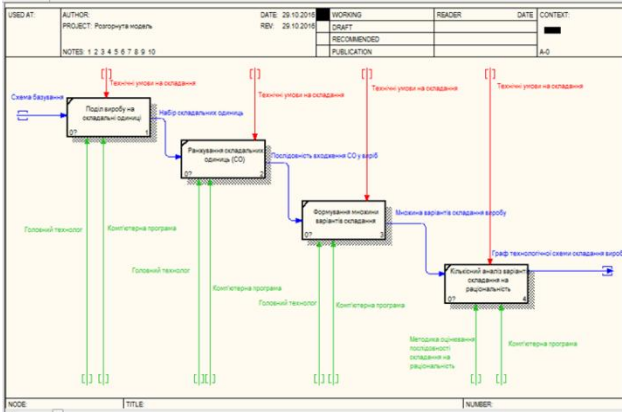


Рис. 3 – Діаграма декомпозиції процесу побудови раціональної послідовності складання виробу

Для проектування функціонального моделювання було використано програму AllFusion Process Modeler.

Розроблений ітераційний метод визначення послідовності складання виробів знайшов своє застосування на прикладі складальної одиниці - редуктор.

Для порівняльного розрахунку економічного ефекту прийняті технологічні процеси: варіант I - ручної; варіант II - автоматичної системи проектування. Результати розрахунку показані на рис. 4.

Висновки. Розроблений ітераційний метод визначення послідовності складання виробів із застосуванням засобів обчислювальної техніки дозволив зменшити час проектування послідовності складання виробів, скоротити витрати на їхню розробку, підвищити якість застосовуваних рішень. Скорочення установів і позицій при складанні призвело до скорочення виробничого циклу, що, у кінцевому рахунку, зменшує суму оборотних коштів, прискорює їхню оборотність, знижує собівартість виробу.

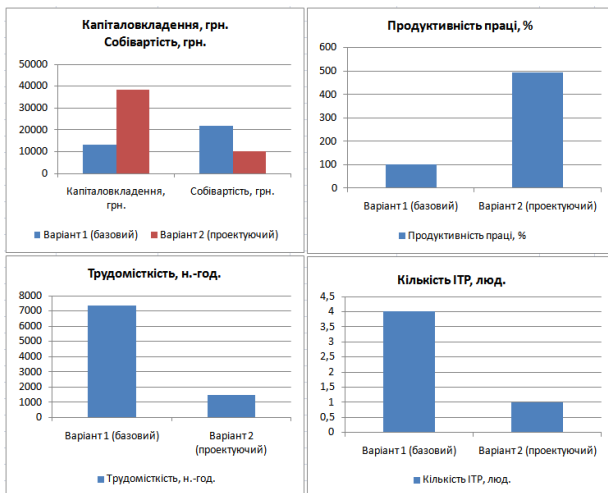


Рис. 4 – Техніко-економічні показники

Заміна монотонної, важкої фізично, ручної праці автоматизовано дозволяє підвищити продуктивність, знизити витрати на виготовлення і підвищити якість виробів, поліпшити культуру праці.

Водночас, автоматизація складальних робіт потребує стабільної якості деталей і складальних одиниць, що надходять на складання. В даний час найчастіше помилки на стадіях, що передують складанню, усуваються на етапі складання за допомогою найпростіших інструментів слюсарями-

складальниками. Тому створення ефективних автоматизованих складальних систем потребує зміни якості праці в механообробці і загівельному виробництві.

В умовах, коли в державі з'являються безробітні, на перший погляд може здатися, що автоматизація буде сприяти ще більшому звільненню людей із сфери виробництва. Разом з цим варто зауважити:

в даний час на більшості підприємств машино- і приладобудування спостерігається недостача висококваліфікованих спеціалістів;

як показує практика, при удосконаленні виробничих процесів, у тому числі при автоматизації, як правило, праця людини переходить у більш високу якість, залишаючи за нею творчу діяльність.

#### Список літератури

- Захаров М. В. Розробка технологічних процесів складання / М. В. Захаров, Ю. В. Тимофєєв. – К. : ІСДО, 1993. – 156 с.
- Гонсалес-Сабатер А. Методические основы автоматизации решения задач проектирования технологии сборки / А. Гонсалес-Сабатер // Сборка в машиностроении, приборостроении. – М. : Машиностроение, 2002. – № 5, – С. 3-10.
- САПР. Общие принципы разработки математических моделей объектов проектирования. // Методические рекомендации. – М. : ВНИИММАШ. – 1980. – 120 с.
- Капустин Н. М. Диалоговое проектирование технологических процессов / Н. М. Капустин, В. В. Павлов, Л. А. Козлов. – М. : Машиностроение, 1983. – 275 с.
- Аверченков В. И. Автоматизация проектирования технологических процессов / В. И. Аверченков, Ю. М. Казаков. – Брянск : БГТУ. – 2004. – 228 с.
- Губич Л. В. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделий машиностроения / Л. В. Губич, И. В. Емельянович, Н. И. Пепкевич [и др.]. – Минск : Беларусь, 2010. – 286 с.
- Цветков В. Д. Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов / В. Д. Цветков – Минск : Наука и техника, 1980. – 224 с.
- Невлюдов И. Ш. Интеллектуальное проектирование технологии роботизированной сборки / И. Ш. Невлюдов, А. М. Цимбал, С. С. Милотина – Х. : НТМТ, 2010. – 207 с.
- Menzel C. The IDEF Family of Languages / C. Menzel, R. J. Mayer // Handbook on Architectures for Information Systems. – Springer Science – Business Media, 1998. – P. 215-249.
- Филиппенко И. В. Модели автоматизированного проектирования технологического процесса сборки / И. В. Филиппенко, В. В. Евсеев, С. С. Милотина // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 1/2(21). – С. 4-8.

#### References (transliterated)

- Zaharov M. V., Timofeev YU. V. *Rozrobka tekhnologichnih procesiv skladannya* [Development of technological processes assembly]. Kiev, ISDO, Publ., 1993. – 156 p.
- Gonsales-Sabater A. Metodicheskie osnovy avtomatizacii resheniya zadach proektirovaniya tekhnologii sborki [Methodical bases of automation technology solutions assembly design problems]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembling in mechanical engineering, instrument making]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. no. 5, pp. 3-10.
- SAPR. Obshchie principy razrabotki matematicheskikh modelej ob'ektov proektirovaniya [CAD. Sharing development principles mathematical models designing objects]. *Metodicheskie rekomendacii* [Methodological Recommendations]. Moscow, VNI-INMASH Publ., 1980. 120 p.
- Kapustin N. M., Pavlov V. V., L. A. Kozlov *Dialogovoe proektirovanie tekhnologicheskikh processov* [Dialog design processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 275 p.
- Averchenkov V. I., Kazakov YU. M. *Avtomatizaciya proektirovaniya tekhnologicheskikh processov* [Design automation of technological processes]. Bryansk, BGTU Publ., 2004. 228 p.
- Gubich L. V., Emel'yanovich I. V. *Informacionnye tekhnologii podderzhki zhiznennogo cikla izdelij mashinostroeniya* [Information technology support lifecycle engineering products]. Minsk: Belarus. nauka Publ., 2010. 286 p.

7. Cvetkov V. D. *Sistemno-strukturnoe modelirovanie i avtomatizaciya proektirovaniya tekhnologicheskikh processov* [System-structural modeling and design automation of technological processes]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1980. 224 p.
8. Nevlyudov I. SH., Cimbali A. M., Milyutina S. S. *Intellektual'noe proektirovanie tekhnologii robotizirovannoj sborki* [Intelligent design of robotic assembly technology]. Kharkov, NTMT, Publ., 2010. 207 p.
9. Menzel C., Mayer R. J. *Semejstvo yazykov IDEF* [The IDEF Family of Languages]. Handbook on Architectures for Information Systems [Spravochnik po arhitekturam dlya informacionnyh sistem]. Springer Science Publ., 1998, pp. 215-249.
10. Filippenko I. V., Evseev V. V., Milyutina S. S. *Modeli avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskogo processa sborki* [Model-aided design of technological assembly process]. Tekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva [Model-aided design of technological assembly process]. Kharkov, 2015, no. 1/2(21), pp. 4-8.

*Надійшла (received)* 31.10.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Ієрархічна система математичного моделювання визначення послідовності складання виробів / Я. І. Чибіряк, Є. В. Коноплянченко, В. В. Нагорний** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 122–126. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

**Иєрархическая система математического моделирования определения последовательности сборки изделий / Я. И. Чибиряк, Е. В. Коноплянченко, В. В. Нагорный** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 122–126. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-004X.

**The hierarchical system of the mathematical modeling of the goods stowadge measurement / Y. I. Chibiryak, EV Konoplyanchenko, VV Nagornyi** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.122–126. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-004X

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Чибіряк Яна Іванівна** – кандидат технічних наук, доцент, Сумський державний університет, доцент кафедри комп'ютерних наук (секції інформаційних технологій проектування), тел.: (050) 770-02-15; e-mail: chibyana@i.ua;

**Чибиряк Яна Ивановна** – кандидат технических наук, доцент, Сумский государственный университет, доцент кафедры компьютерных наук (секции информационных технологий проектирования), тел.: (050) 770-02-15; e-mail: chibyana@i.ua;

**Chibiryak Yana Ivanovna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Sumy State University, Associate Professor at the Department of Computer science (section Information Technologies of Design); tel.: (050) 770-02-15; e-mail: chibyana@i.ua;

**Коноплянченко Євген Владиславович** – кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет, доцент кафедри технічного сервісу, тел.: (050) 750-25-65; e-mail: konopl\_e@i.ua;

**Коноплянченко Евгений Владиславович** – кандидат технических наук, доцент, Сумский национальный аграрный университет, доцент кафедры технического сервиса, тел.: (050) 750-25-65; e-mail: konopl\_e@i.ua;

**Konoplianchenko Ievgev Vladyslavovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Sumy National Agrarian University, Associate Professor of the Department of Technical Service; tel.: (050) 760-25-65; e-mail: konopl\_e@i.ua;

**Нагорний Володимир В'ячеславович** – кандидат технічних наук, ст. викладач, Сумський державний університет, ст. викладач кафедри комп'ютерних наук (секції інформаційних технологій проектування), тел.: (050) 407-10-63; e-mail: vnaornyi1989@gmail.com;

**Нагорный Владимир Вячеславович** – кандидат технических наук, ст. преподаватель, Сумский государственный университет, ст. преподаватель кафедры компьютерных наук (секции информационных технологий проектирования), тел.: (050) 407-10-63; e-mail: vnaornyi1989@gmail.com;

**Nahornyi Volodymyr Vyacheslavovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer, Sumy State University, Associate Professor at the Department of Computer science (section Information Technologies of Design); tel.: (050) 407-10-63; e-mail: vnaornyi1989@gmail.com.

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, О. С. КЛЕНОВ, Д. Ф. НОВИКОВ

**ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

У роботі обґрунтовано основні переваги застосування збірних лезових твердосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями зарубіжного виробництва. Наведено експериментальні дані трудомісткості обробки і сумарних витрат на операціях точіння, фрезерування і свердління інструментами фірми *Tungaloy* і показано їх переваги порівняно з традиційно застосовуваними на підприємствах твердосплавними інструментами. Встановлено, що відношення витрат на заробітну плату і на інструмент на операції точіння приймає значно більші значення, ніж на операції фрезерування. Це вказує на те, що на операції фрезерування фактично максимально використовуються ріжучі можливості інструментів.

**Ключові слова:** механічна обробка, твердосплавний інструмент, зносостійке покриття, операція точіння, операція фрезерування, витрати на заробітну плату, витрати на інструмент, продуктивність обробки, собівартість обробки.

В работе обоснованы основные преимущества применения сборных лезвийных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства. Приведены экспериментальные данные трудоемкости обработки и суммарных затрат на операциях точения, фрезерования и сверления инструментами фирмы *Tungaloy* и показано их преимущество по сравнению с традиционно применяемыми на предприятиях твердосплавными инструментами. Установлено, что отношение затрат на заработную плату и на инструмент на операции точения принимает значительно большие значения, чем на операции фрезерования. Это указывает на то, что на операции фрезерования фактически максимально используются режущие возможности инструментов.

**Ключевые слова:** механическая обработка, твердосплавный инструмент, износостойкое покрытие, операция точения, операция фрезерования, затраты на заработную плату, затраты на инструмент, производительность обработки, себестоимость обработки.

The work proved the main advantages of using modular blade carbide tools with wear-resistant coatings of foreign production. Experimental data processing and the complexity of the total cost of operations of turning, milling and drilling tools *Tungaloy* company and show their advantages over traditionally used at the enterprises of carbide tools. It was found that the ratio of the cost of wages and tool sharpening operations takes much greater value than the milling operation. This indicates that the milling operation for cutting tools actually used by the maximum possible.

**Keywords:** machining, carbide tools, wear-resistant coating, turning operation, milling operation, wage costs, tooling costs, processing performance, processing costs.

**Постановка проблеми.** Важним фактором підвищення ефективності технологій механічної обробки деталей машин стало застосування сучасних металорежущих станків з ЧПУ і прогресивних режущих інструментів, в особливості зарубіжного виробництва, які забезпечують підвищення якості та продуктивності обробки, зниження трудомісткості. Значительний досвід застосування таких інструментів накоплено в Фірмі «ДиМерус Інженеринг» ООО (г. Харків), де спеціалісти за каталогами можуть виробити вибір оптимальної за формою твердосплавної пластини і оправки інструмента для кожного конкретного випадку обробки на підприємстві. Пропонуються також нові режими різання, які забезпечують підвищення технологічних показників обробки. В зв'язі з цим, в нинішній роботі проведено аналіз результатів досліджень і впровадження цих інструментів в виробництво і обґрунтовано умови їх ефективного використання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах [1–3] показано, що сучасні технології механічної обробки, засновані на застосуванні збірних твердосплавних режущих інструментів з зносостійкими покриттями зарубіжного виробництва, характеризуються високими показниками якості та продуктивності обробки, однак вимагають значительних витрат на їх придбання, що підвищує собівартість обробки і відповідально передбачає пошук шляхів її зменшення. В зв'язі з цим в роботі обґрунтовано умови обробки, при яких собівартість обробки новими інструментами менше, а продуктивність більше, ніж при обробці традиційними

напайними твердосплавними інструментами, застосовуваними на підприємствах України.

**Ціль роботи** – визначення умов підвищення ефективного застосування технологій механічної обробки лезвийними твердосплавними інструментами з зносостійкими покриттями зарубіжного виробництва.

**Основний матеріал.** Сучасні режущі інструменти представляють собою збірні конструкції, в яких використовуються режущі пластини з твердих сплавів з зносостійкими покриттями виробництва провідних інструментальних фірм європейських держав, Ізраїля, Японії, Південної Кореї і т.д. Ці інструменти відрізняються високою зносостійкістю та продуктивністю, забезпечують високоякісну обробку деталей, виготовлених з матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями (різні сталі та чугуни, високотверді наплавочні матеріали, кольорові метали, високотверді труднооброблювані неметалічні матеріали і т.д.). Висока твердість і зносостійкість інструментів дозволяють ефективно їх використовувати в умовах високоскоростного різання зі швидкістю 1000 м/хв і більше, а це призводить до суттєвого збільшення продуктивності обробки при забезпеченні високої якості оброблюваних поверхонь деталей [4, 5, 6].

Особливо ефективно застосування цих інструментів на сучасних високооборотних металорежущих станках з ЧПУ типу «оброблювальний центр», що реалізують високоскоростне різання різних видів механічної обробки: точіння, різання, свердління, зенкування і розвертыва-

© Ф. В. Новиков, О. С. Кленов, Д. Ф. Новиков, 2016

ния отверстий, фрезерования, шлифования и т.д. В этом случае обработка сложных по геометрической форме деталей производится фактически с одного станка, что резко повышает точность и качество обрабатываемых поверхностей. При этом многократно снижается трудоемкость обработки, так как не приходится обрабатывать деталь на разных станках при выполнении различных операций различными инструментами, что типично для традиционного машиностроения.

Благодаря концентрации операций также резко сокращается их количество и количество применяемых инструментов. Так, установлено, что в результате внедрения современных металлорежущих станков с ЧПУ и сборных твердосплавных режущих инструментов, работающих в условиях высокоскоростного резания, удалось при обработке сложнопрофильных агрегатов авиационной техники сократить количество технологических операций с 200 до 100, а режущих инструментов с 50 до 20 позиций. В связи с этим, в настоящее время значительная часть ответственных высокоточных деталей, обработка которых характеризовалась высокой трудоемкостью и себестоимостью, обрабатываются по новым технологиям высокоскоростного резания на современных высокооборотных металлорежущих станках с ЧПУ типа «обрабатывающий центр». Эффект обработки достигается еще и за счет того, что на твердосплавные пластины нанесены многослойные покрытия, характеризующиеся высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения. Это снижает силы и температуру резания, и соответственно повышает показатели точности, качества и производительности обработки. Кроме того, применяемые твердые сплавы выдерживают более высокие температуры без снижения режущих свойств, что на порядок и более повышает стойкость инструментов по сравнению с традиционно применяемыми инструментами, изготовленными из отечественных твердых сплавов. Таким образом, переход в область высокоскоростной обработки открывает новые технологические возможности высококачественного изготовления деталей машин и систем.

В фирме «ДиМерус Инженеринг» ООО (г. Харьков) произведены обобщенные расчеты экономической эффективности внедрения режущих инструментов зарубежного производства. Установлено, что в среднем 22 % себестоимости изготовленного изделия составляет стоимость сырья и материалов, 3 % - затраты на инструмент, 75 % - затраты на оборудование, заработную плату и накладные расходы. Если же цену инструмента, закупаемого предприятием, уменьшить на 20 %, то суммарная экономия составит лишь 0,6 %. При увеличении срока службы инструмента на 50 % суммарная экономия составит 1,5 %, а если с помощью этого инструмента увеличить производительность на 20 %, то затраты на оборудование, заработную плату и накладные расходы в себестоимости изделия уменьшатся на 15 %. Поэтому при увеличении стоимости инструмента на 50 % произойдет увеличение производительности и суммарная экономия производства составит 13,5 %. Из этого можно заключить, что, например, снижение на 10 % трудо-

емкости обработки экономически выгоднее, чем экономия на 10 % стоимости инструмента.

На рис. 1 и в табл. 1 приведены суммарные затраты  $Z = Z_{инстр} + Z_{оборуд} + Z_{з/н} + P_{расх}$  на обработку 1 детали (где  $Z_{инстр}$  - затраты на инструмент;  $Z_{оборуд}$  - затраты на оборудование;  $Z_{з/н}$  - затраты на заработную плату;  $P_{расх}$  - прочие расходы) при выполнении операции точения деталей из стали 45 традиционным инструментом (предприятие) и инструментом фирмы *Tungaloy* с применением оптимальных режимов резания. Диаметр детали  $D$ : максимальный 55 мм и минимальный 25 мм; скорость резания  $V = 431,8$  м/мин; обороты шпинделя  $n = 2500$  об/мин; подача на оборот  $S_0 = 0,25$  мм/об.; подача  $S_{мин} = 625$  мм/мин; глубина резания  $t = 3$  мм; количество проходов - 1; суммарное линейное перемещение инструмента - 60 мм.

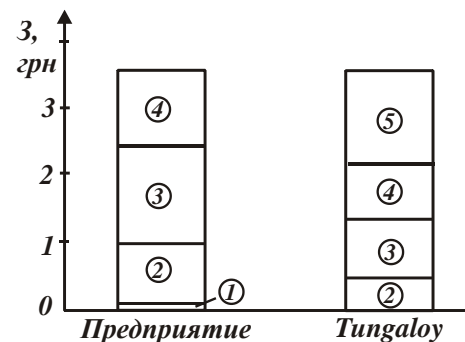


Рис. 1 – Суммарные затраты  $Z$  на выполнения операций точения традиционным инструментом (предприятие) и инструментом фирмы *Tungaloy*: 1 –  $Z_{инстр}$ ; 2 –  $Z_{оборуд}$ ; 3 –  $Z_{з/н}$ ; 4 –  $P_{расх}$ ; 5 – экономия  $E$

Как следует из табл. 1, трудоемкость обработки инструментом фирмы *Tungaloy* приблизительно в 2 раза меньше трудоемкости обработки традиционно применяемым на предприятии инструментом. Поэтому и суммарные затраты  $Z$  на выполнение операции точения (приходящиеся на одну деталь) инструментом фирмы *Tungaloy* меньше.

Затраты на инструмент  $Z_{инстр}$  и на оборудование  $Z_{оборуд}$  при обработке инструментом фирмы *Tungaloy* соответственно в 3,5 раза и в 1,87 раза меньше аналогичных затрат при обработке традиционно применяемым на предприятии инструментом.

Экономия затрат на 1 деталь в размере 1,32 грн (или 40 %) достигнута за счет применения инструментов фирмы *Tungaloy*, изготовленных из более износостойких твердых сплавов с покрытием.

Согласно табл. 1 наибольшими затратами являются затраты на заработную плату рабочего  $Z_{з/н}$ , составляющие соответственно 36,36 % и 38,38 % для обработки традиционным инструментом и инструментом фирмы *Tungaloy*. Поэтому уменьшить суммарные затраты на обработку одной детали  $Z$  можно прежде всего за счет уменьшения этой статьи затрат, которая прямо пропорционально связана с временем обработки детали.



Таблица 1 – Расчет суммарных затрат  $Z$  на выполнение операции точения

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
		Предприятие	<i>Tungaloy</i>	Предприятие	<i>Tungaloy</i>
Трудоемкость обработки $T$	час.	0,0175	0,009		
Затраты на инструмент $Z_{инстр}$	грн.	0,07	0,02	2,12	1,01
Затраты на оборудование $Z_{оборуд}$	грн.	0,86	0,46	26,07	23,24
Затраты на заработную плату $Z_{з/н}$	грн.	1,20	0,76	36,36	38,38
Прочие расходы $P_{расх}$	грн.	1,17	0,74	35,45	37,37
Суммарные затраты $Z$	грн.	3,30	1,98	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн.		1,32		

Таблица 2 – Расчет суммарных затрат  $Z$  на выполнение операции фрезерования

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
		Предприятие	<i>Tungaloy</i>	Предприятие	<i>Tungaloy</i>
Трудоемкость обработки $T$	час.	0,37	0,16		
Затраты на инструмент $Z_{инстр}$	грн.	5,64	2,24	5,69	4,0
Затраты на оборудование $Z_{оборуд}$	грн.	27,18	13,26	27,44	23,73
Затраты на заработную плату $Z_{з/н}$	грн.	29,18	17,81	29,46	31,85
Прочие расходы $P_{расх}$	грн.	37,05	22,6	37,41	40,42
Суммарные затраты $Z$	грн.	99,05	55,91	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	Грн.		43,14		

Таблица 3 – Расчет суммарных затрат  $Z$  на выполнение операции сверления

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
		Предприятие	<i>Tungaloy</i>	Предприятие	<i>Tungaloy</i>
Трудоемкость обработки $T$	час.	0,18	0,18		
Затраты на инструмент $Z_{инстр}$	грн.	0,98	4,16	0,87	3,44
Затраты на оборудование $Z_{оборуд}$	грн.	7,38	7,73	6,57	6,4
Затраты на заработную плату $Z_{з/н}$	грн.	18,20	19,05	16,19	15,77
Прочие расходы $P_{расх}$	грн.	85,85	89,86	76,37	74,39
Суммарные затраты $Z$	грн.	112,41	120,80	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн.		8,39		7,46

Следовательно, чем меньше время обработки детали и соответственно больше производительность обработки, тем меньше затраты на заработную плату рабочего  $Z_{з/н}$ . Исходя из этого, производительность обработки необходимо увеличивать до максимально возможного значения, определяемого режущими свойствами инструмента. В работе [7] приведена аналитическая зависимость для определения себестоимости обработки с учетом двух статей затрат: на заработную плату рабочего  $Z_{з/н}$  и инструмент  $Z_{инстр}$ :

$$C = \frac{1}{1 - \frac{p}{m_1} - \frac{q}{m_1} \cdot t} \cdot \left[ \frac{\alpha_2 \cdot (m_1 - 1)}{\alpha_1} \right]^{\frac{1}{m_1}} \cdot \alpha_1 \cdot \left[ \frac{1}{z} + \frac{z^{m_1 - 1}}{(m_1 - 1)} \right], \quad (1)$$

где  $\alpha_1 = N \cdot \vartheta \cdot S_{час} \cdot k$ ;

$$\alpha_2 = N \cdot \frac{\vartheta \cdot C}{C_4};$$

$N$  – количество обрабатываемых деталей;

$\vartheta$  – объем металла, снимаемого с одной детали, м<sup>3</sup>;

$S_{час}$  – тарифная ставка рабочего, грн;

$k$  – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего;

$C$  – цена режущего инструмента, грн;

$S$  – подача, м/об;

$t$  – глубина резания, м;

$C_4$ ,  $m_1$ ,  $q$ ,  $p$  – постоянные, характеризующие стойкость инструмента, для определенных условий обработки ( $m_1 > p > q$ ;  $m_1 > 1$ );

$$z = Q / Q_{экстр};$$

$Q = V \cdot t \cdot S$  – производительность обработки (при продольном точении), м<sup>3</sup>/с;

$V$  – скорость резания, м/мин;

$Q_{экстр}$  – производительность обработки в точке минимума себестоимости обработки  $C$ .

Установлено, что с увеличением производительности обработки  $Q$  (или  $z = Q/Q_{экстр}$ ) относительная себестоимость обработки  $\bar{C} = C/C_{min}$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума (рис. 2), где  $C_{min}$  – минимальное значение себестоимости обработки.

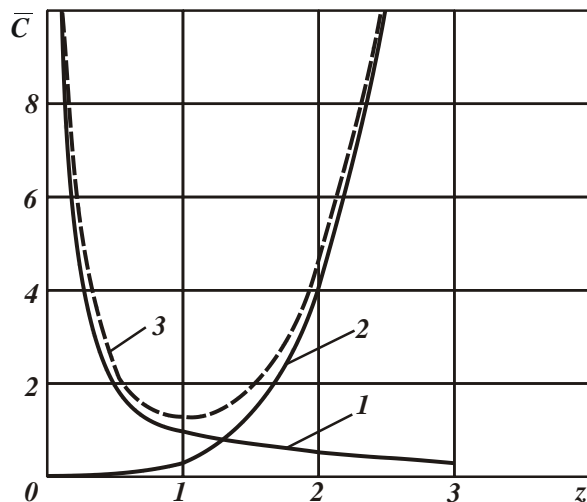


Рис. 2 – Характер изменения относительных затрат на заработную плату рабочего (1), относительных затрат на инструмент (2) и относительной себестоимости обработки  $\bar{C}$  (3) для  $m_1 = 5$ .

Экстремальность зависимости  $C - z$  обусловлена тем, что первое слагаемое (определяющее  $Z_{3/n}$ ) уменьшается с увеличением  $z$ , а второе (определяющее  $Z_{инстр}$ ), наоборот, увеличивается (рис. 2). Минимальное значение  $C_{min}$  определяется из условия  $z = 1$  зависимостью:

$$C = \frac{1}{1 - \frac{p}{m_1} - \frac{q}{m_1} \cdot t} \cdot \left[ \frac{\alpha_2 \cdot (m_1 - 1)}{\alpha_1} \right]^{1/m_1} \cdot \alpha_1 \cdot \left[ 1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (2)$$

В точке минимума себестоимости обработки отношение затрат  $Z_{3/n} / Z_{инстр} = (m_1 - 1)$ .

Согласно экспериментальным данным, при обработке традиционными твердосплавными и быстрорежущими инструментами  $m_1 = 5 \dots 8$ , а при обработке твердосплавными инструментами с износостойкими покрытиями зарубежного производства  $1 < m_1 < 4$ . Следовательно, в точке минимума себестоимости обработки отношение затрат  $Z_{3/n} / Z_{инстр}$  соответственно равно  $4 \dots 7$  и  $0 < Z_{3/n} / Z_{инстр} < 3$ .

Исходя из табл. 1, отношение затрат  $Z_{3/n} / Z_{инстр}$  для варианта 1 (базового) равно 17, а

для варианта 2 (внедряемого - инструментом фирмы *Tungaloy*) равно 38. Это указывает на то, что имеет место значительное недоиспользование возможностей инструментов с точки зрения производительности обработки, т.к. себестоимость обработки значительно больше минимального значения. В связи с этим, производительность обработки необходимо увеличивать за счет увеличения скорости резания  $V$  до значения, при котором себестоимость обработки уменьшится до точки минимума, т.е. когда отношение затрат  $Z_{3/n} / Z_{инстр}$  примет указанные выше значения.

Подтверждением правильности сделанного вывода могут служить экспериментальные данные, полученные при исследовании операции фрезерования деталей из стали Х2ГСНВМ-ВД [7], согласно которым отношение затрат  $Z_{3/n} / Z_{инстр}$  равно 4,5 (при обработке монолитной фрезой  $\varnothing 40$  мм из быстрорежущей стали Р18) и 3,5 (при обработке сборной фрезой  $\varnothing 42$  мм с пластинами из твердого сплава ТТ9030 с износостойким покрытием производства фирмы *TaeguTec*, Южная Корея). В этом случае обработка производится с режимами резания, приближающимися к оптимальным, полученным из условия минимума себестоимости обработки. Таким образом, в работе предложен новый достаточно простой подход к определению оптимальных условий лезвийной обработки на основе заданного отношения затрат  $Z_{3/n} / Z_{инстр}$ .

Для сравнения в табл. 2 приведены суммарные затраты  $Z = Z_{инстр} + Z_{оборуд} + Z_{3/n} + \Pi_{расх}$  на обработку одной детали при выполнении операции фрезерования деталей из стали 45 традиционным инструментом (предприятие) и инструментом фирмы *Tungaloy* с применением оптимальных режимов резания. Соответственно, скорость резания  $V$ : 100,48 и 200,96 м/мин; обороты шпинделя  $n$ : 1000 и 2000 об/мин; количество зубьев фрезы: 4 и 3; подача на зуб  $S_z$ : 0,1 и 0,3 мм/зуб; подача на оборот  $S_o$ : 0,4 и 0,9 мм/об.; подача  $S_{мин}$ : 400 и 1800 мм/мин; глубина резания  $t$ : 4 и 6 мм; ширина резания  $B$ : 60 мм; количество проходов: 3 и 2; диаметр фрезы  $D = 32$  мм.

В отличие от операции точения (табл. 1), на операции фрезерования трудоемкость обработки  $T$  и суммарные затраты  $Z$  значительно больше. Однако, как и на операции точения, на операции фрезерования применение инструмента фирмы *Tungaloy* приводит к уменьшению трудоемкости обработки  $T$  (в 2 раза) и суммарных затрат  $Z$  (в 1,77 раз) по сравнению с традиционно применяемым фрезерным инструментом.

Затраты на инструмент  $Z_{инстр}$  и на оборудование  $Z_{оборуд}$  при обработке инструментом фирмы *Tungaloy* также меньше, чем при обработке традиционным фрезерным инструментом. В результате достигнута экономия затрат на 1 деталь в размере 43,14 грн, что составляет 43,55 %. Как и на операции точения, основной эффект фрезерования – уменьшение суммарных затрат  $Z$  – достигается за счет уменьшения затрат на заработную плату рабочего  $Z_{3/n}$ , т.е. за счет увеличения производительности обработки на

основе применения инструментов, обладающих высокой режущей способностью.

Исходя из табл. 2, отношение затрат  $Z_{3/n}/Z_{инстр}$  для варианта 1 (базового) равно 5,17, а для варианта 2 (внедряемого - инструментом фирмы *Tungaloy*) равно 7,95. Следовательно, в отличие от операции точения (табл. 1), на операции фрезерования отношение затрат  $Z_{3/n}/Z_{инстр}$  значительно меньше и приближается к значениям, соответствующим минимуму себестоимости обработки (рис. 2). Поэтому в этом случае максимально используются режущие возможности инструментов.

Для сравнения в табл. 3 также приведены суммарные затраты  $Z = Z_{инстр} + Z_{оборуд} + Z_{3/n} + P_{расх}$  на обработку одной детали при выполнении операции сверления отверстий в деталях из стали 45 традиционным инструментом (предприятие) и инструментом фирмы *Tungaloy* с применением оптимальных режимов резания. Диаметр сверла  $D = 16,5$  мм;  $V = 181,34$  м/мин;  $n = 3500$  об/мин;  $S_0 = 0,14$  мм/об.;  $S_{мин} = 500$  мм/мин; количество проходов – 1; суммарное линейное перемещение инструмента – 30 мм.

Как и на операциях точения и фрезерования, на операции сверления трудоемкость обработки  $T$  меньше при использовании инструмента фирмы *Tungaloy*. Однако снижение трудоемкости и соответственно повышение производительности обработки незначительно, тогда как суммарные затраты значительно больше, чем на операциях точения и фрезерования. Это связано, прежде всего, со значительным увеличением прочих расходов  $P_{расх}$ .

Из переменных статей затрат наибольшими являются затраты на заработную плату рабочего  $Z_{3/n}$ .

Отношение затрат  $Z_{3/n}/Z_{инстр}$  в данном случае для варианта 1 (базового) равно 18,6, а для варианта 2 (внедряемого - инструментом фирмы *Tungaloy*) равно 4,58. Это указывает на то, что применение инструмента фирмы *Tungaloy* позволяет максимально использовать его режущие свойства, в результате чего себестоимость обработки приближается к минимальному значению (рис. 2). Уменьшение отношения затрат  $Z_{3/n}/Z_{инстр}$  при обработке инструментом фирмы *Tungaloy* предопределяет более высокие значения затрат на инструмент  $Z_{инстр}$ , которые согласно табл. 3, составляют 4,16 грн или 3,44 %. Вместе с тем, на операции сверления экономия затрат на 1 деталь меньше, чем на операциях точения и фрезерования и составляет всего 8,39 грн или 7,46 %.

**Выводы.** В работе обоснованы основные преимущества применения сборных лезвийных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства. Приведены экспериментальные данные трудоемкости обработки и суммарных затрат на операциях точения, фрезерования и сверления инструментами фирмы *Tungaloy* и показано их преимущество по сравнению с традиционно применяемыми на предприятиях твердосплавными инструментами. Установлено, что отношение затрат на заработную плату и на инструмент на операции точе-

ния принимает значительно большие значения, чем на операции фрезерования. Это указывает на то, что на операции фрезерования максимально используются режущие возможности инструментов.

#### Список литературы

1. Обработка резанием деталей с покрытиями : монография / Клименко С.А., Коломиец В.В., Хейфец М.Л. и др.; под общ. ред. Клименко С.А. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
2. Жовтобрюх В.А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / В.А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.
3. Линчевский П.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П. А. Линчевский, Т. Г. Джузурян, А. А. Оргиян. – К.: Техніка, 2001. – 300 с.
4. Кленов О.С. Повышение производительности и качества механической обработки на основе применения прогрессивных режущих инструментов / О.С. Кленов, Ф.В. Новиков, А.Г. Крюк // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 42 (1015). – С. 90-95.
5. Новиков Ф.В. Теоретическое обоснование условий повышения эффективности высокоскоростной обработки / Ф.В. Новиков, О.С. Кленов // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2014. – №42 (1085). – С. 106–111.
6. Басова Е.В. Исследование оптимального угла наклона концевой сферической фрезы относительно обрабатываемых поверхностей деталей сложной формы с переменной жесткостью / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, М.И. Гасанов и др. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2015. – Вып. 69. – С. 108 – 112.
7. Жовтобрюх В.А. Определение оптимальных условий механической обработки по наименьшим затратам на операцию / В.А. Жовтобрюх, Ф.В. Новиков, Е.Ю. Бенин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – Випуск 9 (205). – С. 142–146.

#### References (transliterated)

1. Klimentko S.A., Kolomiets V.V., Kheifets M.L., Pilipenko A.M., Melnythuk Yu. A., Burykin V. V. Obrabotka rezaniem detaley s pokrytyami : monografiya [Machining of parts with coatings: monograph]. Kiev, ISM im. V.N. Bakulya NAN Ukrainy Publ., 2011. 353 p.
2. Zhovtobryukh V.A. Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki detaley gidravlicheskih sistem putem vybora ratsionalnykh parametrov operatsiy po kriteriu sebestoimosti: avtoref. dis. na soiskanie nauthn. stepeni kand. tekh. nauk: spets. 05.02.08 “Tekhnologiya mashinostroeniya” [Improving the efficiency of the machining of parts of hydraulic systems by selecting rational parameters of operations on the criterion of cost: Abstract. Dis. for the scientific. PhD degree. tehn. Sciences: spec. 05.02.08 "Technology of mechanical engineering"]. Mariupol. 2012. 21 p.
3. Linthevskiy P. A., Dzhuguryan T. G., Orgiyana A. A. Obrabotka detaley na odelothno-rastochnykh stankakh [Processing of parts on boring machine]. Kiev, Tekhnika Publ., 2001. 300 p.
4. Klenov O.S., Novikov F.V., Kriuk A.G. Povyshenie proizvoditelnosti i kachestva mekhanicheskoy obrabotki na osnove primeneniya progressivnykh rezhushikh instrumentov [Increase productivity and quality of machining based on the use of advanced cutting tools]. Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Novi rishennya v suthasnykh tekhnologiyakh [Vestnik NTU “KPI”. Collected Works. Series: New solutions in modern technologies]. Kharkiv, NTU “KhPI” Publ., 2013, no. 42 (1015), pp. 90-95.
5. Novikov F.V., Klenov O.S. Teoreticheskoe obosnovanie usloviy povysheniya effektivnosti vysokoskorostnoy obrabotki [The theoretical justification of conditions for increasing the efficiency of high-speed machining]. Visnyk NTU “KhPI”. Seriya: Tekhnologiy v mashinobuduvanni [Vestnik NTU “KPI”. Series: Technology in Engineering]. Kharkiv, NTU “KhPI” Publ., 2014, no. 42 (1085), pp. 106–111.
6. Dobrotvorskii S., Basova E., Hasanov M., Golovatii R. Issledovanie optimalnogo ugla naklona kontsevoy sferi-cheskoy frezyi otositelno

obrabatyvaemykh poverhnostey detaley slozhnoy formy s peremennoy zhestkostyu [Research optimal value of inclination angle in ball end milling relative to machined surfaces parts complex shapes with variable stiffness]. Otkrytiye informatsionnyie i kompyuternyye integriro-vannyye tehnologii: sb. nauch. Tr Kharkov. KhAI. , 2015, vol 69. pp. 108-112.

7. Zhovtobriukh V.A., Novikov F.V., Benin E.Yu. Opredelenie optimalnykh usloviy mekhanicheskoy obrabotki po naimenshim zhatratam na

operatsiiu [Determination of optimum conditions for the machining operation at the lowest cost]. Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universitetu. Seriya: Mashinobudovannya i mashinoznavstvo [Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Engineering and Engineering]. Donetsk, DonNTU Publ., 2012, issue 9 (205), pp. 142–146.

Поступила (received) 07.10.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Ефективне застосування сучасних технологій механічної обробки / Ф. В. Новіков, О. С. Кленов, Д. Ф. Новіков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 127–132. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

**Эффективное применение современных технологий механической обработки / Ф. В. Новиков, О.С. Кленов, Д. Ф. Новиков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 127–132. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

**The effective use of modern machining technologies / F. V. Novikov, O. S. Klenov, D. F. Novikov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.127–132. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Новіков Федір Васильович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

**Новиков Федор Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

**Novikov Fedor Vasiliviyth** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

**Кленов Олег Станіславович** – кандидат технічних наук, директор, Фірма «ДіМерус Інженерінг» ТОВ, м. Харків; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com

**Кленов Олег Станіславович** – кандидат технических наук, директор, Фирма «ДиМерус Инженеринг» ООО, г. Харьков; тел.: +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com

**Klenov Oleg Stanislavovith** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), director of the firm "DiMerus Engineering" Ltd, Kharkiv; tel. : +38-050-34-30-822; e-mail: dimerus@dimerus.com

**Новіков Дмитро Федорович** – аспірант Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

**Новиков Дмитрий Федорович** – аспірант Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

**Novikov Dmitriy Fedorovith** - graduate student Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, В.И. ПОЛЯНСКИЙ

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

Наведено аналітичні залежності для визначення температури різання при лезвійній обробці на основі встановлення балансу тепла, яке надходить в оброблювану деталь, стружку, що утворюється, та в ріжучий інструмент, від дії теплових джерел, які виникають в умовній площині зсуву матеріалу та в зоні тертя стружки, що утворюється, з передньою поверхнею різця. Теоретично доведено, що тепло, яке утворюється в процесі тертя на передній поверхні різця, йде в основному в стружку, в різець йде значно менша кількість тепла. Обґрунтовано умови зменшення температури різання, які полягають головним чином в зменшенні умовного напруження різання та в збільшенні умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу.

**Ключові слова:** температура різання, лезова обробка, оброблювальна деталь, різець, стружка, баланс тепла, теплове джерело, умовне напруження різання.

Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при лезвийной обработке на основе установления баланса тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, образующуюся стружку и режущий инструмент, от действия тепловых источников, возникающих в условной плоскости сдвига материала и в зоне трения образующейся стружки с передней поверхностью резца. Теоретически доказано, что образующееся в процессе трения на передней поверхности резца тепло уходит в основном в стружку, в резец уходит значительно меньшее количество тепла. Обоснованы условия уменьшения температуры резания, состоящие главным образом в уменьшении условного напряжения резания и увеличении условного угла сдвига обрабатываемого материала.

**Ключевые слова:** температура резания, лезвийная обработка, обрабатываемая деталь, резец, стружка, баланс тепла, тепловой источник, условное напряжение резания.

Analytical dependence for determining the temperature at the cutting edge cutting processing by establishing the heat balance, leaving the workpiece, the resulting chips and cutting tools, the action of heat sources, resulting in a conditional shear plane of the material and the friction zone formed chip from the front surface of the tool. Theoretically, it is proved that the resulting process on the front surface friction heat cutter away chip mainly in the cutter takes much less heat. Substantiated conditions reduce the cutting temperature, consisting mainly in the reduction of conditional cutting stress and increase conditional shift angle of the processed material.

**Keywords:** cutting the temperature of the blade machining, the workpiece, the tool, chips, heat balance, heat source, a conditional power cut.

**Постановка проблеми.** В настоящее время на машиностроительных предприятиях Украины широко используются импортные режущие инструменты и технологии металлообработки, позволяющие существенно повысить производительность, точность и качество обработки изделий. Однако, в связи с их высокой стоимостью себестоимость обработки может превышать уровень, достигнутый при использовании традиционных технологий металлообработки. Поэтому для их эффективного использования необходимо знать новые подходы к назначению оптимальных режимов резания, позволяющих снизить силовую и тепловую напряженность процесса резания и повысить технико-экономические показатели обработки. В первую очередь это относится к снижению температуры резания, которая определяет стойкость инструмента, производительность и качество обработки и требует аналитического описания, анализа и выявления условий ее уменьшения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросам аналитического определения температуры резания при лезвийной обработке посвящены работы [1-6], в которых предложены различные теоретические решения. Однако они требуют достаточно сложных расчетов температуры резания с привлечением ряда экспериментальных данных, которые невозможно установить аналитически. Поэтому настоятельная работа является дальнейшим развитием работы [7], в которой приведены результаты теоретического определения и анализа температуры резания при лезвийной обработке на основе упрощенных расчетов с учетом баланса тепла, образующегося в процессе ре-

зания и уходящего в обрабатываемую деталь, стружку и режущий инструмент.

**Цель работы** – аналитическое определение температуры резания при лезвийной обработке и обоснование условий ее уменьшения.

**Изложение основного материала.** При точении острогаченым резцом тепло в зоне резания образуется в основном вследствие сдвиговых деформаций в условной плоскости сдвига материала ОА (рис. 1) и трения сходящей стружки с передней поверхностью резца. Поэтому температура резания будет определяться суммой температур, возникающих в условной плоскости сдвига материала ОА и в зоне трения сходящей стружки с передней поверхностью резца.

Если рассматривать срезаемый слой обрабатываемого материала толщиной в виде пакета бесконечно тонких адиабатических стержней, расположенных перпендикулярно вектору скорости резания, то срез адиабатического стержня 1 начинается в точке А и оканчивается в точке О. Скорость перерезания адиабатического стержня резцом равна  $V_{рез} = V \cdot tg\beta$ , где  $V$  - скорость резания, м/с;  $\beta$  - условный угол сдвига обрабатываемого материала.

За время перемещения адиабатического стержня из положения А` в положение О, происходит его нагревание от 0 до максимального значения  $\theta$ , определяемого интенсивностью сдвиговых деформаций в условной плоскости сдвига материала ОА. Окончательное перерезание адиабатического стержня в точке О приводит к его последующему трению вдоль передней и задней поверхностей резца и дополнительному нагреванию.

© Ф. В. Новиков, В.И. Полянский, 2016

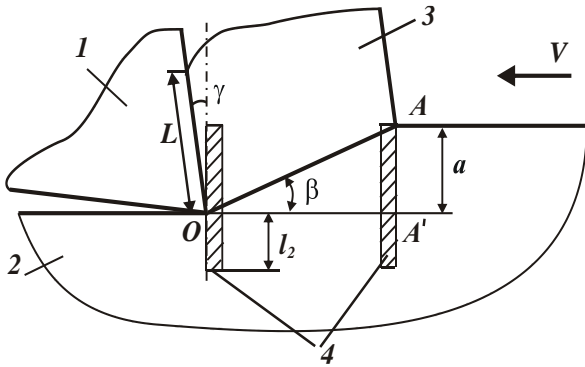


Рис. 1 – Расчетная схема процесса точения: 1 – резец; 2 – обрабатываемый материал; 3 – образующая стружка; 4 – адиабатический стержень.

При резании острозаточенным резцом можно ограничиться рассмотрением нагревания адиабатического стержня при его перемещении из положения А в положение О и последующем трении с передней поверхностью резца, не рассматривая нагревание от трения с задней поверхностью резца.

Как известно, основная часть тепла, образующаяся вследствие трения стружки с передней поверхностью резца, уходит в стружку. Поэтому тепло, уходящее в резец, в первом приближении учитывать не будем. Тогда температура нагревания контактной поверхности стружки за время ее трения с передней поверхностью резца определится [6]:

$$\theta = \frac{q \cdot l_{cmp}}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $q = \frac{P_y \cdot V_{cmp}}{F}$  – плотность теплового потока, действующего на передней поверхности резца, Вт/м<sup>2</sup>;

$P_y = \frac{P_z}{K_{рез}}$  – радиальная составляющая силы резания, Н;

Н;

$P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;

$K_{рез}$  – коэффициент резания (при точении  $K_{рез} > 1$ );

$V_{cmp} = V \cdot \operatorname{tg} \beta$  – скорость перемещения образующей стружки вдоль передней поверхности резца, м/с;

$F = \epsilon \cdot L$  – площадь контакта стружки с передней поверхностью резца, м<sup>2</sup>;

$\epsilon$  – ширина стружки, м;

$L$  – длина контакта стружки с передней поверхностью резца, м;

$l_{cmp} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau$  – глубина проникновения тепла в

образующуюся стружку, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К;

$c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

$\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$$\tau = \frac{L}{V_{cmp}} = \frac{L}{V \cdot \operatorname{tg} \beta} \text{ – время контакта фиксированной}$$

точки на поверхности стружки с передней поверхностью резца, с.

Зависимость (1) получена на основе закона теплопроводности, рассматривая нулевым значение температуры на некотором удалении  $l_{cmp}$  от контактной поверхности стружки (действия теплового источника плотностью  $q$ ).

Согласно зависимости (1), уменьшить температуру  $\theta$  можно уменьшением параметров  $q$  и  $l_{cmp}$ .

С учетом известного соотношения  $P_z = \sigma \cdot a \cdot \epsilon$ , имеем

$$\theta = \frac{\sigma \cdot V \cdot \operatorname{tg} \beta}{\lambda \cdot K_{рез}} \cdot \frac{a}{L} \cdot l_{cmp}; \quad (2)$$

$$l_{cmp} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{L}{V \cdot \operatorname{tg} \beta}}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания (энергоёмкость обработки), Н/м<sup>2</sup>;

$a$  – толщина среза, м.

После преобразований зависимости (2) получено:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot a}{K_{рез}} \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V \cdot \operatorname{tg} \beta}{L}}. \quad (4)$$

С учетом известных соотношений  $K_{рез} = \operatorname{tg} 2\beta$

и  $\operatorname{tg} 2\beta = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg}^2 \beta}$  зависимость (4) примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot a \cdot (1 - \operatorname{tg}^2 \beta) \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V}{L \cdot \operatorname{tg} \beta}}. \quad (5)$$

Из зависимости (5) следует, что наибольшее влияние на температуру  $\theta$  оказывает условное напряжение резания  $\sigma$ . Толщина среза  $a$  связана с длиной контакта стружки с передней поверхностью резца  $L$ : чем больше  $a$ , тем больше  $L$ . Поэтому с увеличением  $a$  температура  $\theta$  будет увеличиваться, однако с меньшей интенсивностью, чем от увеличения  $\sigma$ .

С увеличением условного угла сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  температура  $\theta$  однозначно уменьшается. С учетом формулы Зворыкина К.А. [5]:  $\beta = 45^\circ + (\gamma - \psi)/2$  функция  $\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} [45^\circ + (\gamma - \psi)/2]$ , где  $\gamma$  – передний угол инструмента;  $\psi$  – условный угол трения образующейся стружки с передней поверхностью резца ( $\operatorname{tg} \psi = f$  – коэффициент трения). Следовательно, чем больше угол  $\gamma$  и меньше угол  $\psi$ , тем меньше температура  $\theta$ .

Вполне однозначное влияние на температуру  $\theta$  оказывает скорость резания  $V$ : чем больше  $V$ , тем больше  $\theta$ , что согласуется с известными экспериментальными данными.

Согласно зависимости (3), увеличение скорости резания  $V$  приводит к уменьшению параметра  $l_{cmp}$ , что в определенной степени снижает интенсивность роста температуры  $\theta$  с увеличением скорости резания  $V$ . Увеличение условного угла сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  за счет увеличения угла  $\gamma$  и уменьшения угла  $\psi$  также способствует уменьшению параметра  $l_{cmp}$  и соответственно температуры  $\theta$ .

Произведем расчет температуры  $\theta$  при точении для следующих исходных данных [5]: обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ1:  $\lambda = 13,45$  Дж/(м·с·град.);  $c \cdot \rho = 2,74 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град.); продольная подача  $S = 0,47$  мм/об.; глубина резания  $t = 2,5$  мм;  $V = 20$  м/мин; главный угол резца в плане  $\varphi = 70^\circ$ . Толщина среза равна  $a = S \cdot \sin \varphi = 0,472$  мм.

Экспериментально установлено, что для рассматриваемых условий обработки условное напряжение резания  $\sigma = 1489,36$  Н/мм<sup>2</sup>, условный угол сдвига обрабатываемого материала  $\beta = 36^\circ$ ,  $L \approx 4 \cdot a$  [5]. Подставляя эти исходные данные в зависимость (5), получено:  $\theta = 257,7$  °С.

Параметр  $l_{cmp}$ , определяемый зависимостью (3), для этих исходных данных равен:  $l_{cmp} = 0,277$  мм, т.е. он меньше толщины среза  $a = S \cdot \sin \varphi = 0,472$  мм и соответственно толщины образующейся стружки.

Используя зависимость (1) можно определить температуру, возникающую на передней поверхности резца при условии, что все тепло, образующееся вследствие трения стружки с передней поверхностью резца из твердого сплава ВК6М, уходит в его тело ( $\lambda_{резца} = 50,2$  Вт/м·К). В данном случае в качестве параметра  $l_{cmp}$  следует условно рассматривать толщину режущей части резца, равную  $H = 15$  мм, тогда зависимость (1) примет вид:

$$\theta = \frac{q \cdot H}{\lambda_{резца}}, \quad (6)$$

$$\text{где } q = \frac{\sigma \cdot V}{8} \cdot (1 - tg^2 \beta).$$

Подставляя в зависимость (6) исходные данные, расчетами установлено:  $\theta = 8790$  К =  $9063$  °С. Это значение температуры значительно больше значения температуры  $\theta = 257,7$  °С, рассчитанного по зависимости (5). Следовательно, при расчете температуры по зависимости (6) необходимо принимать меньшие значения плотности теплового потока  $q$ , например  $0,0284 \cdot q$ , тогда значения температур, рассчитанных по зависимостям (5) и (6), будут одинаковы. Из этого можно сделать вывод о том, что в тело резца уходит значительно меньше тепла (2,84 %), чем в образующуюся стружку, т.е. основная часть тепла (97,16 %) уходит в образующуюся стружку. Поэтому расчет температуры  $\theta$ , возникающей на передней поверхности резца, вследствие ее трения с образующейся

стружкой, с достаточной для практики точностью можно производить по зависимости (5).

Для более точного расчета температуры  $\theta$  необходимо установить плотности тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$ , которые определяют максимальные температуры

$$\text{резца } \theta_1 = \frac{q_1 \cdot H}{\lambda_{резца}} \text{ и стружки } \theta_2 = \frac{q_2 \cdot l_{cmp}}{\lambda}.$$

С учетом соотношения  $q = q_1 + q_2$  и условия  $\theta_1 = \theta_2$  получено уравнение:

$$(q - q_2) \cdot \frac{H}{\lambda_{резца}} = \frac{q_2 \cdot l_{cmp}}{\lambda}. \quad (7)$$

Откуда

$$q_2 = \frac{q}{\left(1 + \frac{l_{cmp}}{H} \cdot \frac{\lambda_{резца}}{\lambda}\right)}. \quad (8)$$

Очевидно, вследствие того, что  $H > l_{cmp}$ , знаменатель зависимости (8) принимает значения, близкие к единице, а параметр  $q_2$  - значения, близкие к плотности теплового потока  $q$ , действующего на передней поверхности резца. Следовательно, основная часть тепла уходит в образующуюся стружку, что согласуется с известными экспериментальными данными. Температура  $\theta \approx \theta_2$  определяется зависимостью:

$$\theta = \frac{q \cdot l_{cmp}}{\lambda \cdot \left(1 + \frac{l_{cmp}}{H} \cdot \frac{\lambda_{резца}}{\lambda}\right)}. \quad (9)$$

Как видно, температура  $\theta$ , рассчитанная по зависимости (9), будет меньше температуры, рассчитанной по зависимостям (1) и (5), вследствие того, что небольшая часть тепла уходит в резец, а это уменьшает количество тепла, уходящего в стружку.

Для определения температуры, возникающей в условной плоскости сдвига материала ОА (рис. 1) в связи с его сдвиговыми деформациями, установим баланс тепла, уходящего в образующуюся стружку и в обрабатываемую деталь, с учетом равенства работы резания  $A = P_z \cdot l$  и количества тепла, затрачиваемого на их нагревание до максимальной температуры  $\theta$  [6]:

$$P_z \cdot l = 0,5 \cdot c \cdot m_{дет} \cdot \theta + k \cdot c \cdot m_{cmp} \cdot \theta, \quad (10)$$

где  $l$  – длина пути резания, м;

$m_{дет}$ ,  $m_{cmp}$  – соответственно нагретые массы поверхностного слоя обрабатываемой детали толщиной  $l_2$  и образующейся стружки, кг;

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau - \text{глубина проникновения тепла в}$$

поверхностный слой обрабатываемой детали, м;

$$\tau = \frac{a}{V_{pez}} = \frac{a}{V \cdot tg\beta} \text{ -- время, в течение которого}$$

происходит перерезание резцом бесконечно тонкого адиабатического стержня (рис. 1), т.е. время перемещения адиабатического стержня из положения А в положение О;

$k$  – коэффициент, учитывающий распределение тепла по толщине образующейся стружки ( $k < 1$ ).

Преобразуя зависимость (10) с учетом

$$m_{dem} = \rho \cdot l \cdot \vartheta \cdot l_2; \quad m_{cmp} = \rho \cdot l \cdot \vartheta \cdot a; \quad l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{a}{V \cdot tg\beta}};$$

$P_z = \sigma \cdot S \cdot t$ ;  $a = S \cdot \sin\varphi$ ;  $\vartheta = t / \sin\varphi$ , определена максимальная температура резания  $\theta$ , возникающая в условной плоскости сдвига материала:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left( \sqrt{\frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + k \right)}. \quad (11)$$

При условии, что температура образующейся стружки изменяется равномерно от нуля до значения  $\theta$ , коэффициент  $k=0,5$ . Тогда зависимость (11) опишется:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left( \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + 1 \right)} = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot z. \quad (12)$$

Из зависимости (12) следует, что максимальная температура резания  $\theta$  определяется произведением отношения  $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$  и безразмерного коэффициента

$$z = \frac{1}{\left( \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + 1 \right)}, \text{ который принимает}$$

значения, изменяющиеся в пределах  $0 \dots 1$  (рис. 2). Поэтому максимальная температура резания  $\theta$  принимает значения, меньшие или равные отношению  $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$ .

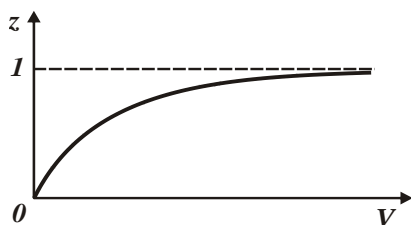


Рис. 2 – Характер изменения безразмерного коэффициента  $z$  от скорости резания  $V$

Согласно зависимости (12), с увеличением  $V$ ,  $S$  и  $\varphi$  максимальная температура резания  $\theta$  увеличивается, асимптотически приближаясь к значению

$2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$ , равному температуре нагрева стружки при условии, что все образующееся при резании тепло уходит в стружку. Это вытекает из зависимости (12), рассматривая первое слагаемое, стоящее в знаменателе в круглых скобках, равным нулю, т.е. при отсутствии тепла, уходящего в обрабатываемую деталь:

$$\theta_{cmp} = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho}. \quad (13)$$

Из сказанного следует, что с увеличением скорости резания  $V$  и продольной подачи  $S$  фактически все тепло, образующееся при резании, уходит на нагревание стружки, а в обрабатываемую деталь уходит небольшая часть тепла. В результате появляется возможность повышения качества обрабатываемой поверхности за счет снижения вероятности образования прижогов, микротрещин, микросколов и других температурных дефектов, возникающих на обрабатываемой поверхности.

Произведем количественную оценку отношения  $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$  и безразмерного коэффициента

$$z = \frac{1}{\left( \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + 1 \right)}, \text{ входящего в зависи-}$$

мость (12), и максимальной температуры резания  $\theta$  для исходных данных, приведенных выше (обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ1):  $\lambda = 13,45$  Дж/(м·с·град.);  $c \cdot \rho = 2,74 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град.);  $S = 0,47$  мм/об.;  $t = 2,5$  мм;  $V = 20$  м/мин;  $\varphi = 70^\circ$ ;  $a = S \cdot \sin\varphi = 0,472$  мм;  $\sigma = 1489,36$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\beta = 36^\circ$ .

Расчетами установлено, что  $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho) = 1042,6^\circ\text{C}$ ;  $z = 0,77$ ;  $\theta = 906,6^\circ\text{C}$ . Следовательно, максимальная температура резания  $\theta$  близка к значению отношения  $2 \cdot \sigma / (c \cdot \rho)$ . Поэтому фактически все образующееся в процессе точения тепло для данных условий обработки уходит в образующуюся стружку. В обрабатываемую деталь уходит небольшое количество тепла, составляющее 23 %.

При условии  $k = 1$  зависимость (11) опишется:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left( \sqrt{\frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + 1 \right)} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z_1. \quad (14)$$

Расчетами установлено, что  $\sigma / (c \cdot \rho) = 521,3^\circ\text{C}$ ;  $z_1 = 0,87$ ;  $\theta = 453,3^\circ\text{C}$ . Поэтому максимальная температура резания  $\theta$  незначительно отличается от значения отношения  $\sigma / (c \cdot \rho)$  и фактически все образующееся в процессе точения тепло (87%) уходит в образующуюся стружку.

Как видно, коэффициент  $k$  значительно влияет на максимальную температуру резания  $\theta$ . При,



$k=0,5$  имеем  $\theta=906,6^{\circ}\text{C}$ , а при  $k=1$  соответственно  $\theta=453,3^{\circ}\text{C}$ , т.е. с увеличением  $k$  в 2 раза максимальная температура резания  $\theta$  уменьшилась в 2 раза. Учитывая то, что случай  $k=0,5$  в большей мере отражает реальные условия нагревания стружки в процессе обработки, следует этот случай принять за основу, тогда  $\theta=906,6^{\circ}\text{C}$ .

Условное напряжение резания  $\sigma$  связано с условным углом сдвига обрабатываемого материала  $\beta$  зависимостью:  $\sigma = \sigma_{сж} / tg\beta$ , где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>. Тогда зависимость (12) примет вид:

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left( \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{tg\beta}{S \cdot V \cdot \sin\varphi}} + tg\beta \right)}. \quad (15)$$

Из зависимости (15) вытекает, что уменьшение максимальной температуры резания  $\theta$  происходит в результате уменьшения переменных параметров  $S$ ,  $V$ ,  $\varphi$  и увеличения  $\beta$ . Однако уменьшение скорости резания  $V$  и продольной подачи  $S$  не эффективно, т.к. это приводит к уменьшению производительности обработки. Поэтому основными условиями уменьшения температуры резания  $\theta$  при точении необходимо рассматривать увеличение угла  $\beta$  и соответственно уменьшение условного напряжения резания  $\sigma$  в результате снижения интенсивности трения реза с обрабатываемым материалом в зоне резания.

Таким образом в работе получена аналитическая зависимость (5) для определения температуры, возникающей в зоне трения сходящей стружки с передней поверхностью реза, и аналитическая зависимость (12) для определения температуры, возникающей в условной плоскости сдвига материала ОА (рис. 1). Расчетами установлено, что их значения составляют  $257,7^{\circ}\text{C}$  и  $906,6^{\circ}\text{C}$ .

Как отмечалось выше, сумма этих температур определяет суммарную температуру резания  $\theta$ , которая для данных условий обработки равна  $1164,3^{\circ}\text{C}$ . Тогда окончательно выражение для определения  $\theta$  с учетом зависимостей (5) и (12) примет вид:

$$\theta = \sigma \cdot a \cdot (1 - tg^2\beta) \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V}{L \cdot tg\beta}} + \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left( \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{S \cdot V \cdot tg\beta \cdot \sin\varphi}} + 1 \right)}. \quad (16)$$

Входящие в первое и второе слагаемые зависимости (16) параметры  $\sigma$ ,  $V$ ,  $S$  (с учетом  $a = S \cdot \sin\varphi$ ) одинаково влияют на суммарную температуру резания  $\theta$ : чем они больше, тем больше  $\theta$ . Поскольку  $\sigma$  связано с  $\beta$  зависимостью [6]:

$\sigma = \sigma_{сж} / tg\beta$ , то с увеличением  $\beta$  суммарная температура резания  $\theta$  будет уменьшаться.

**Выводы.** Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при лезвийной обработке на основе установления баланса тепла, уходящего в обрабатываемую деталь, стружку и резец, от действия тепловых источников, возникающих в условной плоскости сдвига материала и в зоне трения образующейся стружки с передней поверхностью реза. Теоретически доказано, что образующееся в процессе трения на передней поверхности реза тепло уходит в основном в стружку, в резец уходит значительно меньшее количество тепла. Температура, возникающая в условной плоскости сдвига материала, меньше температуры, возникающей на передней поверхности реза в результате ее трения со стружкой. Обоснованы условия уменьшения температуры резания, состоящие главным образом в уменьшении условного напряжения резания и увеличении условного угла сдвига обрабатываемого материала.

#### Список литературы

1. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
2. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
3. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
4. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 127 с.
5. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
6. Добротворський С. С. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей / С. С. Добротворський, Є. В. Басова та ін. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: збірник наукових праць. – 2015. – № 822. – С. 7–13.
7. Новиков Ф.В. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов / Ф.В. Новиков, С.М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: междунар. научн.-техн. конф., 19–20 апреля 2007 г.: труды – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. – С. 8–20.

#### References (transliterated)

1. Reznikov A.N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov [Thermal physics processes of mechanical processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 279 p.
2. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessa shlifovaniya [Optimization of the grinding process]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 175 p.
3. Silin S.S. Metod podobiya pri rezanii materialov [Similarity method in cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 152 p.
4. Evseev D. G. Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazi-vnoy obrabotke [Formation properties of the surface layers with abrasion]. Saratov: Sarat. un-t Publ., 1975. 127 p.
5. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov [Fundamentals of metal cutting theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 343 p.
6. Dobrotvorsky S.S., Basova E.V., ets. Komp'yuterne proektuvannya ta modelyuvannya tekhnologichny'x procesiv vy'sokoshvy'dkisnogo frezeruvannya zagartovany'x [Computer design and simulation processes high-speed milling hardened steels] *Visnyk Nacional'nogo universy'tetu «Lviv'ska politexnika». Seriya: Opty'mizaciya vy'robny'chy'x procesiv i tekhnichny'j kontrol' u mashynobuduvanni ta pry'ladobuduvanni : zbirny'k naukovy'x prac'.* 2015. No 822. pp. 7–13.
7. Novikov F.V., Yatsenko S.M. Povyshenie effektivnosti tekhnologii finishnoy obrabotki detaley par treniya porshnevykh nasosov [Improved technology finishing details steam piston pumps friction]. Fizicheskie i kompiuternye tekhnologii: mezhdun. nauthn. -tekn. konf., 19–20 aprelya 2007 g.: Trudy [Physical and computer

technology: Intern. nauchn.-tehn. Conf., April 19-20, 2007. Works].  
Kharkov, KhNPK "FED" Publ., 2007, pp. 8-20.

Поступила (received) 07.10.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Аналітичне визначення температури різання при лезовій обробці / Ф. В. Новіков, В. І. Полянський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 133–138. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Аналитическое определение температуры резания при лезвийной обработке / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 133–138. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.**

**Analytical determination of the cutting blade temperature during processing / F. V. Novikov, V. I. Polyanskiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.133–138. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Новіков Федір Васильович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

**Новиков Федор Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

**Novikov Fedor Vasiliviyth** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru .

**Полянський Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, Генеральний директор, ТОВ «Імперія металів», м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com .

**Полянский Владимир Иванович** – кандидат технических наук, Генеральный директор, ООО «Империя металлов», г. Харьков; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com .

**Polyansky Vladimir Ivanovich** - Candidate of Technical Sciences, General Director of LLC "Empire Metals", Kharkov; tel .: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com .

УДК 621.923

Ф. В. НОВИКОВ, И. А. РЯБЕНКОВ

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПЕРАЦИЙ ЗУБОШЛИФОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В роботі аналітично визначено температуру різання при зубошліфуванні зубчастих коліс за методом профільного копіювання та науково обґрунтовано умови її зменшення до прийнятної значення за рахунок застосування високопористих абразивних кругів із двостороннім конічним профілем типу 2П. Розрахунково-експериментальним шляхом визначено оптимальні параметри режиму шліфування, які дозволяють знімання всього припуску (0,4 мм) здійснювати за один прохід круга за схемою плоского глибокого шліфування з невеликою швидкістю деталі (3 м/хв), а остаточну обробку - за кілька проходів круга за схемою багатопрохідного шліфування зі збільшеною швидкістю деталі. Розрахунками встановлено, що запропонована аналітична залежність для визначення температури різання достатньо об'єктивно відображає закономірності формування якості обробки при шліфуванні.

**Ключові слова:** зубошліфування, метод профільного копіювання, температура різання, тепловий потік, високопористі абразивні круги, глибоке шліфування, багатопрохідне шліфування

В работе аналитически определена температура резания при зубошлифовании зубчатых колес по методу профільного копирования и научно обоснованы условия ее уменьшения до приемлемого значения за счет применения высокопористых абразивных кругов с двухсторонним коническим профилем типа 2П. Расчетно-экспериментальным путем определены оптимальные параметры режима шлифования, позволяющие съём всего припуска (0,4 мм) производить за один проход круга по схеме плоского глубокого шлифования с небольшой скоростью детали (3 м/мин), а окончательную обработку – за несколько проходов круга по схеме многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали. Расчетами установлено, что предложенная аналитическая зависимость для определения температуры резания достаточно объективно отражает закономерности формирования качества обработки при шлифовании.

**Ключевые слова:** зубошлифование, метод профільного копирования, температура резания, тепловой поток, высокопористые абразивные круги, глубинное шлифование, многопроходное шлифование.

The paper analytically determined cutting temperature for gear grinding of gears according to the method of profile copy and scientifically substantiated conditions reduce it to an acceptable level through the application of highly abrasive wheels with double-sided conical profile type 2P. Settlement and experimentally determined the optimal parameters of the grinding mode, allowing removal of all allowance (0.4 mm) to produce a single run laps around the circuit of the flat deep grinding with small parts speed (3 m / min), and final treatment - a few passes over the circle multipass grinding circuit with the increased speed of parts. Calculations revealed that the proposed analytical dependence for determining the temperature of cutting quite objectively reflects the regularities of formation of quality in grinding processing.

**Keywords:** tooth-grinding, profile backup method, cutting temperature, heat flux, highly porous grinding wheels, creep feed grinding, grinding multipas.

**Постановка проблеми.** Зубчатые колеса являются одними из основных деталей машин, которые широко применяются в современном машиностроении. Вместе с тем, они являются и одними из наиболее трудноизготавливаемых деталей машин в связи с высокими требованиями к точности и качеству обработки сложнопрофильных рабочих поверхностей. В особой мере это относится к операциям зубошлифования, на которых окончательно формируются параметры точности и качества обрабатываемых поверхностей и которые характеризуются чрезвычайно высокой трудоемкостью [1]. Уменьшить трудоемкость обработки можно применением технологии зубошлифования по методу профільного копирования [2]. В этом случае съём припуска происходит, по сути, по схеме глибокого (однопроходного) шлифования, что снижает вспомогательное время обработки, связанное с реверсированием стола станка, по сравнению со съёмом припуска по схеме многопроходного шлифования. В результате может быть увеличена производительность обработки. Однако, как известно [2], данный метод зубошлифования характеризуется относительно низкой точностью обработки. В этом отношении зубошлифование по методу обкатывания считается более эффективным. Вместе с тем, проведенные экспериментальные исследования технологических закономерностей зубошлифования зубчатых колес приводов шахтных конвейеров по методу профільного копирования на зубошлифовальном станке мод. Hofler rapid 1250 [3] показали положительные результаты с точки зрения повышения производи-

тельности обработки. Это открывает новые возможности интенсификации процесса зубошлифования. Однако для этого необходимо знать рациональные параметры режима резания, характеристики абразивных кругов и другие условия обработки, гарантированно обеспечивающие выполнение высоких требований по качеству обрабатываемых поверхностей при одновременном увеличении производительности обработки.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В отличие от зубошлифования зубчатых колес по методу обкатывания, их зубошлифованию по методу профільного копирования в научно-технической литературе уделено значительно меньше внимания [1-4]. Это связано с тем, что точность обработки для данного метода ниже, чем для зубошлифования по методу обкатывания [2]. Поэтому эффективной областью применения зубошлифования по методу профільного копирования является обработка зубчатых колес невысокой точности (7–8 степени точности), а эффективной областью применения зубошлифования по методу обкатывания – обработка ответственных зубчатых колес (4–7 степени точности). Основная причина низкой точности обработки зубьев колес при зубошлифовании по методу профільного копирования состоит в том, что в связи с увеличением глубины шлифования (по сравнению с зубошлифованием по методу обкатывания) существенно увеличиваются силы резания, которые приводят к значительным погрешностям обработки и соответственно снижению точности обрабатываемых поверхностей. Естествен-

© Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков, 2016

но, повысить точность обработки в этих условиях можно снижением силовой напряженности процесса шлифования за счет применения абразивных кругов, обладающих повышенной режущей способностью. Как показано в работе [4], перспективным решением данной задачи является применение высокопористых абразивных кругов, работающих в режиме самозатачивания и обеспечивающих существенное снижение интенсивности трения в зоне резания. Это открыло новые технологические возможности осуществления операций зубошлифования по методу профильного копирования. Появилась возможность достижения 4 степени точности обработки. В результате зубошлифование по методу профильного копирования стало вполне конкурентоспособным с традиционными технологиями зубошлифования по методу обкатывания. Причем, эффект достигается как с точки зрения повышения точности, так и производительности обработки, поскольку съем припуска в данном случае осуществляется за один или несколько проходов круга по схеме глубинного шлифования (с относительно небольшой скоростью продольной подачи). Кроме того, обеспечение высокой производительности обработки в данном случае позволяет осуществлять процесс нарезания зубьев колес по методу профильного шлифования взамен применяемых технологий лезвийной обработки (зубофрезерования, зубодолбления или зубострогания). Для эффективного использования зубошлифования по методу профильного копирования необходимо располагать знаниями его технологических возможностей и отличительных особенностей по сравнению с зубошлифованием по методу обкатывания и методикой выбора рациональных параметров обработки, в первую очередь по критерию качества обрабатываемых поверхностей с целью исключения образования температурных дефектов на обрабатываемых поверхностях [5 -7]. Поэтому важно произвести выбор параметров обработки, гарантированно обеспечивающих заданную температуру резания, независимо от условий проявления различных факторов нестабильности процесса зубошлифования, главным образом, неравномерности снимаемого припуска, который может колебаться в значительных пределах.

**Цель работы** – теоретический анализ условий уменьшения температуры резания при зубошлифовании зубчатых колес по методу профильного копирования.

**Изложение основного материала.** Расчетная схема параметров процесса зубошлифования зубчатых колес по методу профильного копирования с применением круга с двухсторонним коническим профилем типа 2п приведена на рис. 1,а. Для удобства расчетов конусная (рабочая) часть шлифовального круга представлена в виде ступенчатого круга с бесконечно малой шириной ступени  $H$ . Можно предположить, что все ступени круга работают в одинаковых условиях. Тогда фактическая глубина шлифования будет равна  $t_{\phi} = t / \sin \alpha / 2$ , где  $t$  – номинальная глубина шлифования, м;  $\alpha = 60^{\circ}$ . Исходя из этого, при анализе процесса зубошлифования зубчатых колес по методу профильного копирования можно рассматривать работу лишь одной ступени шлифовального круга

га шириной  $H$  по схеме плоского шлифования (рис. 1,б).

В научно-технической литературе приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании, которые достаточно адекватно описывают тепловую напряженность процесса шлифования [6, 8]. По сути, в настоящее время разработана формализованная теория теплофизики шлифования, позволяющая производить расчеты сложных температурных полей, возникающих в поверхностном слое обрабатываемых деталей при шлифовании, и на этой основе научно обоснованно подходить к выбору рациональных характеристик шлифовальных кругов и параметров режимов шлифования. Однако, полученные теоретические решения, как правило, требуют численных расчетов для конкретных (частных) условий обработки, что затрудняет установление общих технологических закономерностей формирования параметров качества обработки при шлифовании и определение условий повышения производительности с учетом ограничения по температуре шлифования. Это требует разработки новых упрощенных теоретических подходов к расчету и анализу температуры шлифования, позволяющих производить оптимизационные расчеты параметров режимов шлифования по критериям наибольшей производительности или наименьшего штучного времени обработки с учетом ограничения по температуре шлифования (температурному фактору).

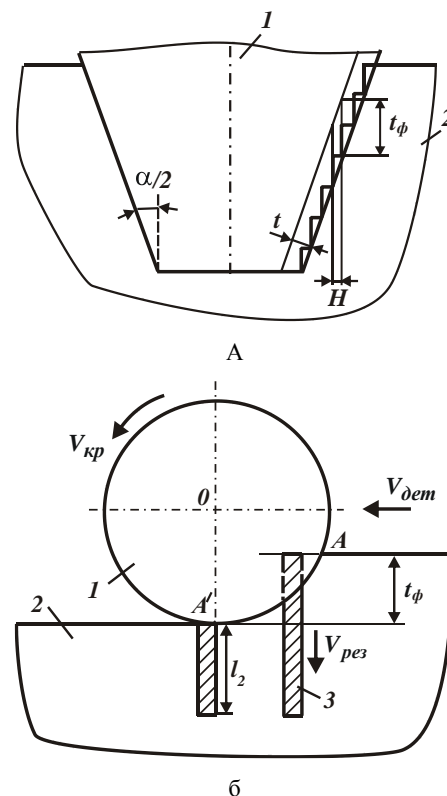


Рис. 1 – Расчетная схема параметров процесса зубошлифования зубчатых колес по методу профильного копирования: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень.

Существенным недостатком разработанных математических моделей является то, что фактически невозможно расчетным путем определить глубину

внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании, поскольку в основу решения сложных дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных положены функции распределения, которые изменяются в неограниченных пределах, а это приводит к неопределенности решений по определению глубины внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании. Исходя из этого, возникает необходимость в разработке упрощенной математической модели определения температуры резания при шлифовании с целью определения рациональных параметров режимов шлифования и характеристик круга для заданной температуры резания.

Для этого в основу расчетов может быть положена схема плоского шлифования (рис. 1,б), принимаемая в первом приближении, что все тепло, возникающее в процессе резания, идет на нагревание обрабатываемой детали. В последующих расчетах необходимо учитывать тепло, уходящее в образующиеся стружки. Это позволит достаточно правильно аналитически описать закономерности формирования температуры резания при шлифовании.

В данной работе расчет температуры резания в процессе шлифования производится на основе расчетной схемы, в которой снимаемый припуск представлен в виде множества элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые за время перемещения из точки А в точку А' перерезаются со скоростью  $V_{рез}$  шлифовальным кругом, вращающимся со скоростью  $V_{кр}$ , при скорости перемещения детали  $V_{дет}$  (рис. 1,б). На каждый адиабатический стержень (стенки которого изолированы) действует тепловой источник плотностью  $q$ , что приводит к распространению тепла лишь вдоль адиабатического стержня без учета распространения тепла в образующиеся стружки.

Температура резания  $\theta$  при шлифовании может быть описана зависимостью:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$l_2$  – глубина внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/м·К.

Как видно, уменьшить температуру резания  $\theta$  при шлифовании можно двумя путями: уменьшением плотности теплового потока  $q$  или уменьшением  $l_2$ . Однако, эти параметры взаимозависимы между собой и поэтому для определения условий уменьшения температуры резания  $\theta$  необходимо установить функциональные связи между параметрами  $q$  и  $l_2$ .

Плотность теплового потока  $q$  определяется зависимостью:

$$q = \frac{N}{F} = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F} = \frac{\sigma \cdot S_{мгн} \cdot V_{кр}}{F}, \quad (2)$$

где  $N = P_z \cdot V_{кр}$  – мощность шлифования, Вт;

$F$  – площадь контакта круга с обрабатываемым материалом, м<sup>2</sup>;

$P_z = \sigma \cdot S_{мгн}$  – тангенциальная составляющая силы резания при шлифовании, Н;

$\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;

$S_{мгн}$  – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга, м<sup>2</sup>;

$V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

Параметр  $S_{мгн} = Q / V_{кр}$ , где  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с. Тогда

$$q = \frac{\sigma \cdot Q}{F}. \quad (3)$$

Уменьшить плотность теплового потока  $q$  можно уменьшением условного напряжения резания  $\sigma$ , производительности обработки  $Q$  и увеличением площади контакта круга с обрабатываемым материалом  $F$ . Из этого вытекает эффективность перехода от шлифования периферией круга к шлифованию торцом круга, поскольку площадь контакта круга с обрабатываемой поверхностью во втором случае значительно больше, а это ведет к уменьшению плотности теплового потока  $q$ .

Очевидно, уменьшить производительность обработки  $Q$  экономически нецелесообразно, гораздо эффективнее уменьшать условное напряжение резания  $\sigma$  путем обеспечения высокой режущей способности круга, снижая трение в зоне резания за счет применения эффективных технологических сред и т.д.

Важным условием уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$  является и использование прерывистого шлифования, которое за счет ударного характера взаимодействия круга с обрабатываемой деталью обеспечивает поддержание на его рабочей поверхности развитого режущего рельефа и снижение энергоемкости обработки.

При традиционном многопроходном шлифовании периферией круга параметр  $F = H \cdot l$ , где  $H$  – ширина шлифования, м;  $l$  – длина дуги контакту круга с обрабатываемой деталью, м. В свою очередь, производительность обработки  $Q = H \cdot V_{дет} \cdot t_{ф}$ , где  $V_{дет}$  – скорость перемещения детали, м/с;  $t_{ф}$  – фактическая глубина шлифования, м. Тогда зависимость (3) примет вид:

$$q = \frac{\sigma \cdot V_{дет} \cdot t_{ф}}{l}, \quad (4)$$

$$\text{где } l = \sqrt{\frac{2 \cdot t_{\phi}}{\left(\frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дем}}\right)}};$$

$R_{кр}$ ,  $R_{дем}$  – соответственно, радиусы круга и детали, м.

При плоском шлифовании  $R_{дем} \rightarrow \infty$ , тогда:

$$q = \sigma \cdot V_{дем} \cdot \sqrt{\frac{t_{\phi}}{2 \cdot R_{кр}}}. \quad (5)$$

Как видно, плотность теплового потока  $q$  в меньшей мере зависит от глубины шлифования  $t_{\phi}$ , чем от скорости перемещения детали  $V_{дем}$ . При этом плотность теплового потока  $q$  уменьшается с увеличением радиуса круга  $R_{кр}$ .

Проведем теоретический анализ глубины внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании  $l_2$ , т.е. параметра, который входит в зависимость (1) и аналитически описывается:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau, \quad (6)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);

$\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  – время контакта круга с фиксированным сечением обрабатываемой поверхности, с.

Как видно, единственно возможным условием уменьшения параметра  $l_2$  является уменьшение времени контакта круга с фиксированным сечением обрабатываемой поверхности  $\tau$ . Исходя из этого, эффективно применение многопроходного шлифования, которое характеризуется достаточно высокой скоростью перемещения детали  $V_{дем}$ , поскольку

$$\tau = \frac{l}{V_{дем}} = \sqrt{2 \cdot t_{\phi} \cdot R_{кр}} \cdot \frac{1}{V_{дем}}. \quad (7)$$

Уменьшить время  $\tau$  можно так же за счет уменьшения фактической глубины шлифования  $t_{\phi}$  и применения прерывистого шлифования.

Подставляя зависимости (5), (6) и  $t_{\phi} = t / \sin \alpha / 2$  в зависимость (1), получена обобщенная зависимость для определения температуры резания:

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{V_{дем} \cdot t}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{R_{кр} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}}. \quad (8)$$

Согласно данной зависимости, наибольшее влияние на температуру резания  $\theta$  при шлифовании оказывает условное напряжение резания  $\sigma$ . Поэтому основной эффект при снижении температуры резания  $\theta$  при шлифовании может быть достигнут за счет уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$  путем обеспечения высокой режущей способности круга, применяя для этого эффективные методы правки или обеспечивая работу круга в режиме интенсивного самозатачивания.

С учетом удельной производительности обработки  $Q_{y\delta} = V_{дем} \cdot t$  зависимость (8) опишется:

$$\theta = \sigma \cdot \sqrt{\frac{Q_{y\delta}}{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}} \cdot \sqrt{\frac{2t}{R_{кр} \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}}. \quad (9)$$

Как видно, при заданном значении  $Q_{y\delta}$  эффективно номинальную глубину шлифования  $t$  уменьшать, т.е. применять схему многопроходного шлифования. Это второе основное условие уменьшения температуры резания  $\theta$  при шлифовании. Однако эффект от выполнения этого условия не столь значителен, так как номинальная глубина шлифования  $t$  входит в зависимость (9) в небольшой степени – 0,25. Это указывает на целесообразность уменьшения температуры резания  $\theta$  за счет уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$ .

В условиях заданной удельной производительности обработки  $Q_{y\delta} = V_{дем} \cdot t$  параметр  $l_2$  равен:

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \frac{t}{Q_{y\delta}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t \cdot R_{кр}}{\sin \frac{\alpha}{2}}}. \quad (10)$$

Однако, уменьшить параметр  $l_2$  и тем самым возможную глубину дефектного слоя обработанной детали, обусловленную температурным фактором, можно уменьшением номинальной глубины шлифования  $t$  и увеличением скорости перемещения детали  $V_{дем}$ , т.е. применением многопроходного шлифования. Отсюда следует, что использование многопроходного шлифования позволяет решить две важных задачи: уменьшить температуру резания  $\theta$  и глубину проникновения тепла в поверхностный слой обра-

тываемой детали при шлифовании  $l_2$  с целью повышения качества обработанной детали.

Произведем количественную оценку температуры резания  $\theta$  при шлифовании абразивным кругом формы 2П по зависимости (8) для исходных данных: обрабатываемый материал – сталь 18ХГН2МФБ;  $\sigma = 1,5 \cdot 10^4$  Н/мм<sup>2</sup>;  $c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град);  $\lambda = 42$  Вт/(м·град);  $\alpha = 60^\circ$ ;  $t = 0,01$  мм;  $V_{dem} = 10$  м/мин.

Расчетами установлено, что  $\theta = 240$  °С. Следовательно, при многопроходном шлифовании температура резания принимает небольшое значение, что не приводит к снижению качества обработки из-за образования температурных дефектов.

Как видно, предложенная зависимость для определения температуры резания достаточно объективно отражает закономерности формирования качества обработки при шлифовании.

В работе [3] показано, что образование прижогов на обрабатываемой поверхности при шлифовании данного материала абразивным кругом 2П 400x32x127 24А 10 СМ2 8 К6 происходит при предельных значениях номинальной глубины шлифования  $t = 0,07$  мм и скорости детали  $V_{dem} = 12$  м/мин. Согласно зависимости (8), для этих значений глубины шлифования и скорости детали температура резания  $\theta = 1131$  °С. Вполне очевидно, что превышение этой температуры резания может приводить к возникновению прижогов и других температурных дефектов на обрабатываемой поверхности.

Как отмечалось выше, уменьшить температуру резания  $\theta$  при шлифовании и повысить производительность обработки можно уменьшением условного напряжения резания  $\sigma$ , применяя для этого высокопористые абразивные круги. Экспериментально установлено [3], что при шлифовании высокопористым кругом T1ESP 400x32x127 93A46M15WPG11W (производство компании "Винтертур") условное напряжение резания  $\sigma$  может быть уменьшено в 2 раза. Это означает, что при скорости детали  $V_{dem} = 3$  м/мин предельная номинальная глубина шлифования  $t$  может быть увеличена до величины снимаемого припуска (например, до 0,4 мм) при обеспечении температуры резания  $\theta = 1045$  °С, установленной на основе зависимости (8). В результате появляется возможность реализации процесса зубошлифования зубчатых колес по методу профильного копирования, осуществляемого, по сути, по схеме глубинного шлифования с более высокой производительностью обработки (по сравнению с зубошлифованием по методу обкатывания), достигаемой главным образом за счет уменьшения количества проходов круга и снижения вспомогательного времени обработки.

Несомненно, увеличение номинальной глубины шлифования  $t$  до величины снимаемого припуска, согласно зависимости (10), приводит к увеличению глубины внедрения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании  $l_2$ . Однако, как установлено экспериментально, при этом на обрабатываемых поверхностях отсутствуют прижоги и другие температурные дефекты, т.к. температура ре-

зания  $\theta = 1045$  °С ниже критического значения. Поэтому необходимо первый проход круга осуществлять по схеме плоского глубинного шлифования с небольшой скоростью детали (3 м/мин), а последующие проходы круга при окончательной обработке (2 – 3 прохода) – по схеме многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали.

**Выводы.** В работе аналитически определена температура резания при зубошлифовании зубчатых колес по методу профильного копирования и научно обоснованы условия ее уменьшения до приемлемого значения за счет применения высокопористых абразивных кругов с двухсторонним коническим профилем типа 2П. Расчетно-экспериментальным путем определены оптимальные параметры режима шлифования, позволяющие съем всего припуска (0,4 мм) производить за один проход круга по схеме плоского глубинного шлифования с небольшой скоростью детали (3 м/мин), а окончательную обработку – за несколько проходов круга по схеме многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали. Это обеспечивает увеличение производительности обработки по сравнению с зубошлифованием по методу обкатывания. Расчетами установлено, что предложенная аналитическая зависимость для определения температуры резания достаточно объективно отражает закономерности формирования качества обработки при шлифовании и поэтому может быть использована для анализа и проектирования эффективных технологических процессов финишной абразивной обработки.

#### Список литературы

1. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с.
2. Кацук В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кацук, А.Б. Верещакгин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
3. Нежебовський В. В. Технологічне забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шквотних конвеєрів на операціях зубошлифування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В.В. Нежебовський. – Одеса: ОНПУ, 2011. – 21 с.
4. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
5. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
6. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.
8. Евсеев Д.Г. Формирование свойств поверхностных слоев при абразивной обработке / Д.Г. Евсеев. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 127 с.

#### References (transliterated)

1. Yakimov A.V. Abrasive diamond processing shaped surfaces. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 212 p.
2. Kashuk V.A., Vereshagin A.B. Spravochnik shlifovshika [Manual grinder]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 480 p.
3. Nezhbovskiy V. V. Tekhnologichne zabezpechennya yakosti obrobky zubhastykh kolic privodiv shakhtnykh konveeriv na operatsiyakh zuboshlifuvannya: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 "Tekhnologiya mashinobuduvannya" [Technological support processing quality gears drive shaft conveyors in operations zuboshlifuvannya: Author. Dis. on competition sciences. degree candidate. Sc. Sciences specials. 05.02.08 "Mechanical Engineering"]. Odesa: ONPU Publ., 2011. 21 p.

4. *Starkov V.K.* Shlifovanie vysokoporistymi krugami [Highly porous grinding circles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 688 p.
5. *Reznikov A.N.* Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov [Thermal physics processes of mechanical processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 279 p.
6. *Yakimov A.V.* Optimizatsiya protsessa shlifovaniya [Optimization of the grinding process]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 175 p.
7. *Silin S.S.* Metod podobiya pri rezanii materialov [Similarity method in cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 152 p.
8. *Evseev D. G.* Formirovanie svoystv poverkhnostnykh sloev pri abrazivnoy obrabotke [Formation properties of the surface layers with abrasion]. Saratov: Sarat. un-t Publ., 1975. 127 p.

*Поступила (received) 07.10.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Підвищення ефективності операцій зубошліфування зубчастих коліс / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 138–144. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

**Повышение эффективности операций зубошлифования зубчатых колес / Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 138–144. – Библиогр.: 15 назв. – ISSN 2079-004X.

**Improved gear grinding gears / F. V. Novikov, I. A. Ryabekov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.138–144. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-004X.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Новіков Федір Васильович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Природничі науки та технології» Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

**Новиков Федор Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Естественные науки и технологии» Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнеця, г. Харьков; тел.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

**Novikov Fedor Vasiliviyth** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of "Science and Technology" Kharkiv National Economic University named after Semen Kuznets, Kharkiv; tel.: (0572) 69-55-62; e-mail: fokusnic1@rambler.ru

**Рябенков Ігор Олександрович** – кандидат технічних наук, старший викладач Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка, м. Харків; тел.: (057) 759-66-31; e-mail: rigor0212@gmail.com.

**Рябенков Игорь Александрович** – кандидат технических наук, старший преподаватель Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков; тел.: (057) 759-66-31; e-mail: rigor0212@gmail.com.

**Ryabekov Igor Aleksandrovith** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Lecturer of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasilenko, Kharkiv; tel.: (057) 759-66-31; e-mail: rigor0212@gmail.com.



УДК 621.923

А.А.КЛОЧКО, М.И.ГАСАНОВ, Е.В. БАСОВА

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ВЫБОРА И НАЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗАКАЛЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Наведено аналітичні та експериментальні залежності для визначення технологічного регламенту вибору і призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні з урахуванням забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару зубчастих коліс і визначення оптимальних умов зубофрезерування, при яких забезпечується повне участь в зніманні припуску при зубофрезеруванні всіх зубів фрези. Технологічний регламент вибору і призначення параметрів зубообробки розроблений на науковій основі технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару циліндричних, загартованих зубчастих коліс і гарантує: забезпечення високої продуктивності при максимальній стійкості інструменту, технологічне забезпечення параметрів поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс при максимальній оброблюваності, високу технологічну стабільність зубообробного обладнання і інструменту при обробці циліндричних зубчастих коліс.

**Ключові слова:** технологічний регламент, параметри обробки, зубофрезерування, поверхневий шар, загартовані зубчасті колеса, продуктивність, стійкість інструмента, зубооброблювальне обладнання.

Приведены аналитические и экспериментальные зависимости для определения технологического регламента выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя зубчатых колес и определения оптимальных условий зубофрезерования, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска при зубофрезеровании всех зубьев фрезы. Технологический регламент выбора и назначения параметров зубообробки разработан на научной основе технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических, закаленных зубчатых колес и гарантирует: обеспечение высокой производительности при максимальной стойкости инструмента, технологическое обеспечение параметров поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при максимальной обрабатываемости, высокую технологическую стабильность зубообрабатывающего оборудования и инструмента при обработке цилиндрических зубчатых колес.

**Ключевые слова:** технологический регламент, параметры обработки, зубофрезерование, поверхностный слой, закаленные зубчатые колеса, производительность, стойкость инструмента, зубообрабатывающее оборудование.

The analytical and an experimental dependence to determine production schedules selection and appointment of the processing parameters for hobbing with a view to ensuring the required parameters of the surface layer of gears and gear milling determine the optimum conditions under which ensured full participation in the stock removal at all hobbing cutter teeth. Production schedules selection and appointment settings gear treatment developed on a scientific basis of technological maintenance of the surface layer state parameters of cylindrical hardened gears and guarantees: to provide high performance with maximum tool life, technological maintenance of the surface layer of cylindrical gears parameters for maximum workability, high technological stability of gear cutting the processing tool and spur gears.

**Keywords:** production schedules, processing options, hobbing, surface layer hardened gears, productivity, tool life, gear machinery.

**Постановка проблеми.** При назначении параметров состояния контактирующих поверхностей цилиндрических зубчатых колес и при разработке технологических процессов их обработки необходимо знать возможности технологических методов по обеспечению этих параметров.

**Анализ последних исследований и публикаций.** На основании проведенных экспериментов приведены обобщенные данные для эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес из конструкционных и легированных сталей при механических методах их обработки (табл. 1) [1, 2, 5].

**Цель работы** – аналитическое определение технологического регламента выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес.

**Изложение основного материала.** Экспериментальные исследования показали связь между собой высотных параметров шероховатости  $R_a$ ,  $H_p$  – высоты сглаживания макроотклонения,  $W_p$  – высоты сглаживания профиля волнистости,  $R_z$  – высоты неровностей профиля по десяти точкам,  $S_m$  – среднего шага неровностей, (табл. 1):

а) при скоростном зубофрезеровании

$$R_{\max} = 5,0 \quad R_a ; \quad (1)$$

$$R_z = 4,0 \quad R_a ; \quad (2)$$

б) при зубофрезеровании фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава

$$R_{\max} = 6,0 \quad R_a ; \quad (3)$$

в) при зубофрезеровании червячными модульными фрезами ГОСТ9324-80

$$R_{\max} = 7,0 \quad R_a ; \quad (4)$$

$$R_z = 5,5 \quad R_a . \quad (5)$$

Параметр  $t_m$ , не приведенный в таблице из-за малого диапазона его изменения, следует принимать при скоростном зубофрезеровании, обеспечивающем эвольвентновершинную финишную обработку 60 – 70%; при зубофрезеровании фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава 40 – 50%; при зубофрезеровании червячными модульными фрезами ГОСТ9324-80 – 50%.

Данные таблицы позволяют установить технологические методы, которые обеспечивают получение требуемых параметров состояния контактирующих поверхностей цилиндрических зубчатых колес. Для определения конкретных условий обработки необходимо учитывать их функциональную связь с параметрами состояния обрабатываемых поверхностей.

Ниже приведены эмпирические зависимости для расчета параметров состояния эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес при механических методах их обработки.

Зубофрезерование фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава и минералокерамики после термообработки ТВЧ и спрерной закалки [3] (сталь 34ХНМ):

Таблица 1 – Технологические методы зубообработки при обеспечении системы параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес

Метод обработки	Параметры состояния поверхностного слоя								Физико-механические свойства поверхностного слоя			
	Шероховатости					Волнистости						
	$R_a$ мкм	$R_z$ мкм	$R_p$ мкм	$S_m$ мм	$S$ мм	$W_z$ мкм	$W_m$ мкм	$S_{mw}$ мм	$k=H_{\mu 0}/H_{\mu}$ %	$h_{\mu}$ мм	$\sigma_0$ МПа	$h_{\sigma}$ мм
Зубофрезерование	4,5	60	50,0	0,5	0,1	8,0	5,0	2,5	120	0,2	250	0,1
	2,5	40	16	0,3	60		16	10,0	180	—	—	0,2
	0,9	20	4,0	—	—	25,0	0,63	0,8-4,0	110—	0,5	300	0,08
Скоростное зубофрезерование	1,9	16,	10,0	1,2	1,2	12,5	8,0	2,5-	110—	0,15	300	0.01 5
	0,8	0	—	5	5-	—	40	12,0	180	—	—	—
	0,40		30	—	5,0	60,0	2,0-	0,8	100—	0,25	350	0,25
	0,20	50	2,5	5,0	0,3	3,0	12,5	8,0	150	0,08	200	0.10

$$R_a = 4830 \frac{S_z^{1.69} t^{0.15}}{V^{1.25} \rho^{0.14} Z_1^{0.24} Z_2^{0.28} (HRC)^{4.02} t^{0.32} K_{\text{фп}}^{1.24}} \frac{1}{k_m k_0}; \quad (6)$$

$$R_p = 8730 \frac{S_z^{1.15}}{V^{1.27} \rho^{0.24} Z_1^{0.14} Z_2^{0.17} (HRC)^{2.82} t^{0.26} K_{\text{фп}}^{1.24}} \frac{1}{k_m k_0}; \quad (7)$$

$$W_z = 5500 \frac{S_z^{1.01} t^{0.46} \rho^{0.16} \gamma^{0.54}}{V^{1.52} \rho^{0.24} Z_1^{0.14} Z_2^{0.17} (HRC)^{2.82} K_{\text{фп}}^{1.24}}; \quad (8)$$

$$S_m = 17 \cdot 10^3 \frac{(HRC)^{1.58}}{\rho^{0.24} Z_1^{0.07} Z_2^{0.11} V^{2.04}} \frac{k_0}{k_m}; \quad (9)$$

где  $S_z$  – подача на зуб (0,06 – 0,5 мм);  $S_0$  – подача на оборот (0,1 – 0,5 мм/об);  $V$  – скорость резания при фрезеровании (0,6... 5 м/с);  $t$  – глубина резания (0,3... 2,5 мм);  $\rho$  – радиус округления режущей кромки ( $\rho = 0,05 - 0,8$  мм);  $\gamma$  – передний угол фрезы;  $HRC$  – твердость обрабатываемого зубчатого колеса ( $HRC 30...60$ );  $Z_1$  и  $Z_2$  – число зубьев нарезаемого зубчатого колеса и число режущих кромок зубьев фрезы,  $k_m$  – коэффициент, зависящий от марки обрабатываемого материала;  $k_0$  – коэффициент, зависящий от способа формообразования эвольвентных поверхностей цилиндрического зубчатого колеса.

Значения коэффициентов  $k_m$ ,  $k_0$  приведены в табл. 2. Значения некоторых параметров шероховатости при при скоростном зубофрезеровании фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава и минералокерамики при зубофрезеровании зубчатых колес из сталей 38ХМЮА и 34ХНМ на оп-

тимальных режимах ( $V=285$  м/мин – скорость резания при зубофрезеровании,  $S_0 = 0,5$  мм/об – подача на оборот) приведены в табл. 2.

В зависимости от условий скоростного зубофрезерования наибольшая волнистость может наблюдаться в поперечном или продольном направлении. При расчетах необходимо принимать наибольшее значение волнистости.

Результаты экспериментальных исследований показали, что наряду с режимами и геометрией инструмента значительное влияние на шероховатость поверхности оказывает жесткость оборудования, на котором обрабатывается зубчатое колесо.

Так, при зубофрезеровании зубчатого колеса из стали 40Х получены следующие уравнения с учетом статической жесткости оборудования  $j_{cm}$

Таблица 2 – Значения коэффициентов в уравнениях 6, 7, 8, 9 [4]

Марка стали	Коэффициент				
	$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
Сталь 45	7,0	0,65	0,60	0,50	1,9
Сталь 40Х	21,5	0,75	0,55	1,38	0,25
Сталь 34ХНМ	12,0	0,85	0,65	0,36	0,15
Сталь 38ХМЮА	16,8	1,1	0,68	0,15	0,16

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \rho^{k_4} \cdot (50 + \gamma)^{k_5} \cdot \alpha^{k_6} \cdot j_{\bar{n}\bar{o}}^{k_7} \quad (10)$$

При скоростном чистовом зубофрезеровании (из стали 40X, HRC 30 – 35):

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \rho^{k_4} \cdot n^{k_5} \cdot (HRC)^{k_6} \cdot j_{\bar{n}\bar{o}}^{k_7} \quad (11)$$

где  $V$  – скорость резания;  $\rho$  – радиус округления режущей кромки ( $\rho=0,05 - 0,8\text{мм}$ );  $n$  – число проходов;  $HRC$  – твердость обрабатываемого зубчатого колеса;  $j_{cm}$  – статическая жесткость станка (9,8 – 29,4 МН/м).

При скоростном зубофрезеровании фрезами

$$R_a = k_0 \cdot \frac{R_{a,\bar{e}\bar{n}\bar{a}}^{k_1} \cdot S_{i\bar{o}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}} \quad (12)$$

$$R_p = k_0 \cdot \frac{R_{p,\bar{e}\bar{n}\bar{a}}^{k_1} \cdot S_{i\bar{o}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}} \quad (13)$$

$$W_z = k_0 \cdot \frac{W_{z,\bar{e}\bar{n}\bar{a}}^{k_1} \cdot S_{i\bar{o}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}} \quad (14)$$

$$W_p = k_0 \cdot \frac{W_{p,\bar{e}\bar{n}\bar{a}}^{k_1} \cdot S_{i\bar{o}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}} \quad (15)$$

$$H_{\mu 0} = 10 \cdot k_0 \cdot \frac{p^{k_2} \cdot n^{k_4}}{R_{a,\text{дцх}}^{k_1} \cdot S_{np}^{k_3} \cdot V^{k_5}} \quad (16)$$

где  $S_{np}$  – продольная подача (130 – 420мм/мин);  $\rho$  – радиус округления режущей кромки фрезы ( $\rho = 0,05 - 0,8\text{ мм}$ );  $n$  – число проходов (1 – 3);  $V$  – скорость резания (3... 4,5 м/с).

Значения коэффициентов  $k_0 - k_5$  приведены в табл. 3.

При скоростном зубофрезеровании фрезами параметры шероховатости можно определить

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \rho^{k_4} \cdot n^{k_5} \cdot (HRC)^{k_6} \cdot j_{\bar{n}\bar{o}}^{k_7}$$

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \gamma^{k_4} \cdot r_p^{k_6} \cdot P^{k_6} \cdot D^{k_7} \cdot S_{\text{д}}^{k_8} \cdot v_{\text{д}}^{k_9} \quad (17)$$

где  $V$  и  $S$  – соответственно скорость резания и подача ( $V = 3,00 - 4,05\text{ м/с}$ ) ( $S = 7,00 - 8,00\text{ мм/об}$ ).

Характеристики шероховатости при скоростном зубофрезеровании фрезами зубчатых колес определяются из следующих уравнений с радиусом округления режущей кромки фрезы ( $\rho < 0,05\text{ мм}$ ):

$$R_a = 0.006\rho^{1.03} P^{-0.4} V^{0.37} S^{0.35} \text{ мкм} \quad (18)$$

$$R_p = 0.026\rho^{0.96} P^{-0.34} V^{0.26} S^{0.61} \quad (19)$$

при скоростном зубофрезеровании фрезами крупногабаритных зубчатых колес с радиусом округления режущей кромки фрезы ( $\rho \geq 0,05\text{ мм}$ )

$$R_a = 0.18\rho^{1.22} I^{-0.03} P^{-0.41} V^{0.36} S^{0.29} \quad (20)$$

$$R_p = 0.21\rho^{0.96} I^{-0.03} P^{-0.37} V^{0.35} S^{0.3} \quad (21)$$

Последовательность формирования поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес регламентируется исходными технологическими параметрами.

Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя зубчатых колес устанавливает оптимальные условия зубофрезерования, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска при зубофрезеровании всех зубьев фрезы (табл. 4).

Таблица 3 – Значение коэффициентов  $k_0 - k_5$  для характеристик качества поверхностей цилиндрических крупномодульных зубчатых колес

Характеристика поверхностного слоя	Исследуемый материал	Коэффициенты					
		$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$
$R_a$	45 (220HB)	3.4	0.986	0.896	0,202	0,023	-0,004
	40X (HRC 30)	8.0	0,765	0,651	0,103	0,206	0,090
	34XHM (HRC 48)	12,1	0,796	0,752	0,028	0,034	0,019
$R_p$	45 (220HB)	3.1	0,927	0,969	0,257	0,027	-0,017
	40X (HRC 30)	17.4	0,640	0,809	0,103	0,206	0,090
	34XHM (HRC 48)	17,8	0,772	0,890	0,064	0,071	0,026
$W_a$	45 (220HB)	0.07	0,112	0,427	0,063	-0,076	-0,066
	40X (HRC 30)	51,6	1,037	1,123	0,087	0,134	0,058
	34XHM (HRC 48)	6,4	0,907	0,538	0,014	0,016	
$W_p$	45 (220HB)	0,1	0,086	0,727	-0,009	0,017	-0,006
	40X (HRC 30)	114,2	1,125	1,369	0,106	0,208	0,087
	34XHM (HRC 48)	5,9	0,940	0,492	0,015	0,022	
$H_{\mu 0}$	45 (220HB)	102,3	+0,042	0,312	0,024	0,013	0,018
	40X (HRC 30)	120,6	+0,033	0,266	0,014	0,025	-0,013
	34XHM (HRC 48)	236,0	+0,008	0,180	0,038	0,008	0,005

Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки распространяется для зубофрезерования цилиндрических, обычной твердости 220...320 HB и закаленных HRC 46...63 зубчатых колес.

Регламент устанавливает геометрические параметры червячных модульных и специальных скоростных немодульных дисковых фрез во взаимосвязи с технологическими режимами резания и параметрами поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес.

Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании гарантирует:

1. Обеспечение высокой производительности при максимальной стойкости инструмента;

2. Технологическое обеспечение параметров поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при максимальной обрабатываемости;

3. Высокую технологическую стабильность зубообрабатывающего оборудования, дорогостоящего инструмента при обработке цилиндрических зубчатых колес.

Научные основы технологического регламента выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании базируются на основополагающих теоретических положениях теории о трении, технологии машиностроения и теории резания.

Процесс встречного зубофрезерования при врезании первого зуба фрезы сопровождается скольжением, температура в зоне резания резко возрастает,

что является одной из причин повышенного износа фрез по задним поверхностям и возникновению силового поля генерируемого передней поверхностью фрезы. По достижении определенной толщины слоя  $a_f$  на угле скольжения  $\psi_{ск}$  процесс пластической деформации переходит в резание [5].

В процессе снятия стружки деформация слоев обрабатываемого материала возникает не только в области плоскости скалывания стружки, но и впереди зуба фрезы и под плоскостью резания.

Металл, подминаемый режущим лезвием, в стружку не переходит. Деформированный слой после прохождения режущего лезвия определяет глубину наклепа ( $h_{упр}$ ).

Трение поверхностных слоев трущихся материалов имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Трение обусловлено объемным деформированием материала и преодолением межмолекулярных связей, возникающих между сближенными участками трущихся поверхностей.

Трансформация напряженно-деформированного состояния зоны стружкообразования, остаточные напряжения, возникающие в образующемся поверхностном слое цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес, и упрочнением поверхностного слоя при увеличении радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho$ , мм от 0,08 мм до 0,450 мм устанавливают пути воздействия внешних параметров, взаимосвязи между внутренними факторами, что в совокупности определяет

Таблица 4 – Значения коэффициентов при различных методах зубообработки в обеспечении системы параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес

Обрабатываемый материал	Исследуемый материал	Коэффициенты				
		$k_0$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
45 (220HB)	$R_a$	139,4	-0,18	0,3	0,5	-0,28
	$v$	7,6	20,20	-0,28	0,32	-0,51
	$b$	0,02	0,24	-0,08	1,13	0,19
40X (HRC 30)	$R_a$	228,6	-0,11	0,47	-0,78	-0,22
	$v$	0,4	-0,07	-0,12	0,31	-0,3
	$b$	0,04	0,16	-0,08	0,12	0,12
34XHM (HRC 48)	$R_a$	287,0	0	0,5	-0,75	-0,38
	$v$	0,21	-0,08	-0,11	0,30	-0,11
	$b$	0,08	0,06	-0,11	0,11	0,17
Обрабатываемый материал	Исследуемый материал	Коэффициенты				
		$k_5$	$k_6$	$k_7$	$k_8$	$k_9$
45 (220HB)	$R_a$	-0,18	-1,15	0,97	0,33	0
	$v$	-0,58	-0,44	0,46	0,6	0,40
	$b$	0	0,46	-0,42	-0,19	-0,06
40X (HRC 30)	$R_a$	-0,26	-1,15	0,86	0,27	0
	$v$	0,27	-0,29	0,66	0,02	0,2?
	$b$	0	0,58	-0,62	-0,11	-0,04
34XHM (HRC 48)	$R_a$	-0,21	-1,27	1,05	0,39	0
	$v$	0,75	-0,33	0,77	0,07	0,23
	$b$	0	-0,61	-0,72	-0,16	-0,06

напряжения и деформации в зоне формообразования и в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента и трения по задней поверхности инструмента, размеры площади полного и пластического контакта, форму, размеры и ориентацию зоны стружкообразования с учетом интегральных параметров угла скольжения  $\Psi_{ск}$ , соответствующего пластическому оттеснению (передеформированию) материала, когда материал обтекает инструмент без отделения от основной массы, коэффициент формообразования поверхностного слоя, средний коэффициент трения, работа и силы резания.

Как показали исследования, распространение напряжений, возникающих под воздействием радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho$ , за линию среза представляет определяющий фактор в формировании поверхностного слоя изделия, а технологические процессы формирования поверхностного слоя представляют комплексную систему. Такое положение обусловлено влиянием распределения контактных нагрузок на задних поверхностях инструмента (рис. 1) на качество поверхностного слоя цилиндрических закаленных зубчатых колес за счет температурного фактора непосредственного изменяющего свойства поверхностного слоя и силового поля, порождаемого задней поверхностью инструмента в зависимости от радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho$ .

Определение минимальных углов скольжения при обработке зубчатых крупномодульных колес методом фрезерования, исходя из физико-химических процессов механики трения, позволяет значительно повысить эффективность процесса формообразования зубьев и эксплуатационные свойства их поверхностей.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют определить оптимальные углы скольжения  $\Psi_{ск}$ , при которых обеспечивается стабильность процесса зубофрезерования, необходимые условия по стойкости инструмента и качество обрабатываемой поверхности по отношению к наибольшему углу контакта зуба фрезы  $\Psi_{max}$  с обрабатываемым зубчатым изделием (рис. 2). Соотношение между углом скольжения  $\Psi_{ск}$  и наибольшим углом контакта зуба фрезы  $\Psi_{max}$  с обрабатываемой поверхностью позволяет установить эффективность процесса формообразования через коэффициент эффективности функционального формирования поверхностного слоя  $K_p$  [6].

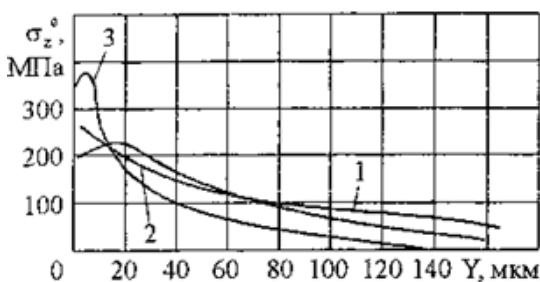


Рис. 1 – Эпюры остаточных напряжений, полученные при скоростном зубофрезеровании стали 34ХНМ: припуск на сторону  $t = 0,8$  мм;  $S_{мин} = 140$  мм/мин;  $v = 3,00$  м/с: 1 –

$$\rho = 0,08 \text{ мм}; 2 - \rho = 0,140 \text{ мм}; 3 - \rho = 0,400 \text{ м/м}$$

Изменение толщины срезаемого слоя при достижении минимального угла скольжения  $\Psi_{скмин}$  изменяет коэффициент трения при наличии обязательного всплеска (скачка), что неблагоприятно сказывается на динамику резания и качество обработанной поверхности и определяется коэффициентом трения, зависящим от молекулярно-атомной шероховатости обрабатываемой поверхности и инструмента.

$$\text{Угловой шаг зубьев фрезы } \varpi = \frac{360^\circ}{Z} \quad (22)$$

Максимальный угол контакта зуба фрезы с обрабатываемым зубчатым колесом (максимальный угол скольжения)  $\Psi_{max}$

$$\sin \Psi_{max} = \frac{H_i}{R_{\delta\delta}} = \frac{2 \cdot H_i}{d_{\delta\delta}} = \frac{\sqrt{t \cdot (d_{\delta\delta} - t)}}{d_{\delta\delta}}, \quad (23)$$

$$\Psi_{max} = \arcsin \frac{H_i}{R_{\delta\delta}} = \arcsin \frac{2 \cdot H_i}{d_{\delta\delta}} = \arcsin \frac{2 \cdot \sqrt{t \cdot (d_{\delta\delta} - t)}}{d_{\delta\delta}}, \quad (24)$$

где  $t = 2,25m$  – высота зуба зубчатого колеса.

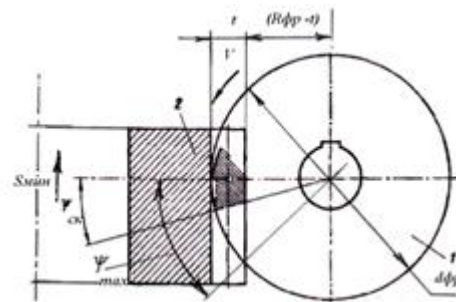


Рис. 2 – Схема расчета параметров обработки при зубофрезеровании зубчатых колес

К заключению об ограниченном участии силового поля, создаваемого задней поверхностью фрезы в формировании поверхностного слоя привели опыты с варьированием радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho$ .

Только при увеличении радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho$  отмечается рост остаточных напряжений, т.е. при

$$\rho \geq a_i / K_{сож},$$

при

$$\rho \leq a_i / K_{сож}$$

процесс пластической деформации переходит в резание (Табл. 5).

Рассмотрены технологические условия обеспечения показателей качества поверхностного слоя от угла скольжения при обработке закаленных колес [5, 6].

В настоящее время проводятся работы, направленные на разработку и освоение новых специальных технологий зубообработки закаленных зубчатых колес. Технологический процесс зубообработки зубчатых колес должен обеспечить геометрическую точность и качество поверхностного слоя зубьев колес. В то же время геометрическая точность зубчатых колес характеризуется точностью относительного движения при формировании эвольвентного профиля зубьев,

точністю относительных движений производящих режущих кромок инструмента относительно обрабатываемого зубчатого изделия и шероховатостью исполнительных и образующихся поверхностей.

Таблица 5 - Последовательность моделирования формирования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho=0,08; 0,10; 0,12\text{мм}$

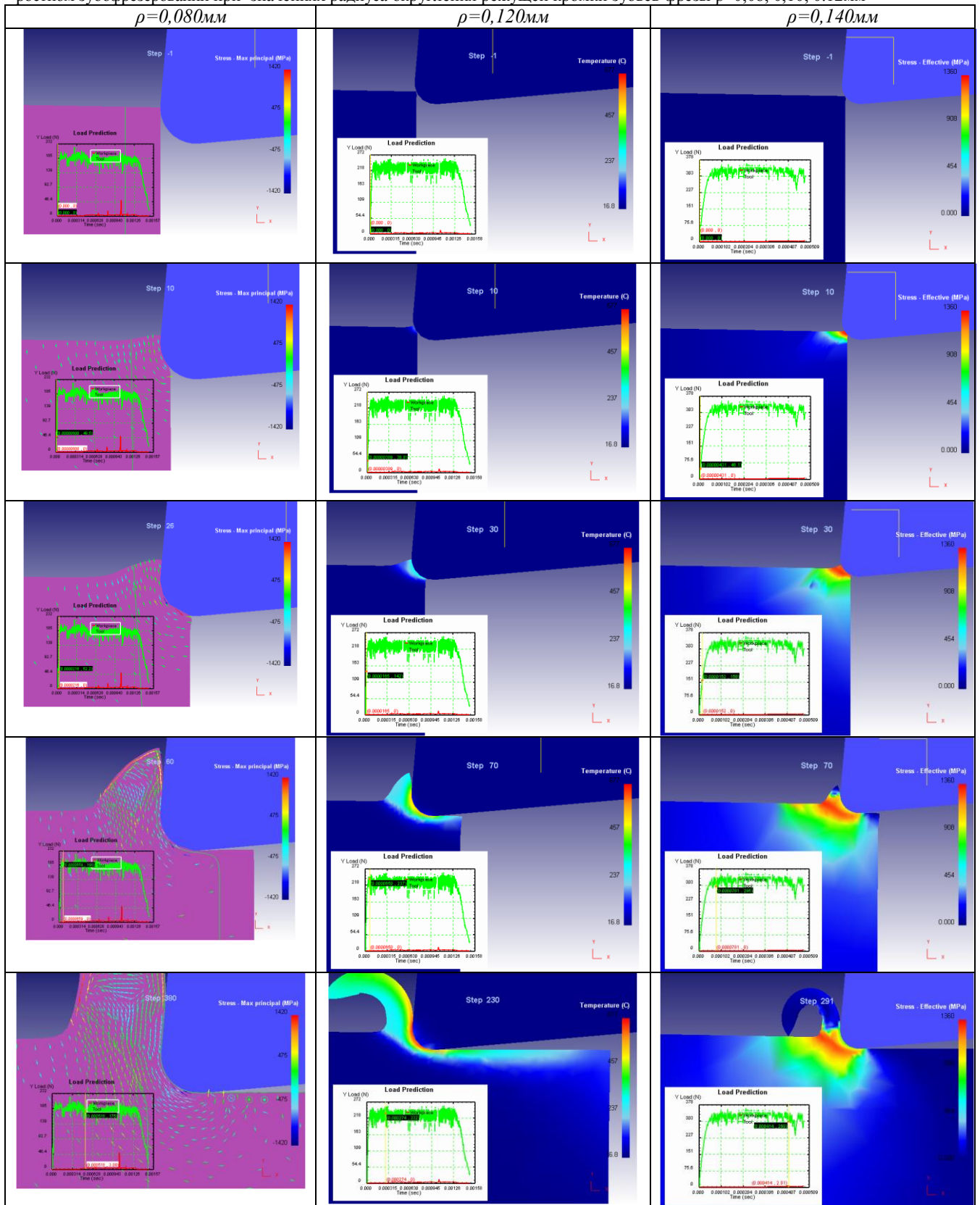
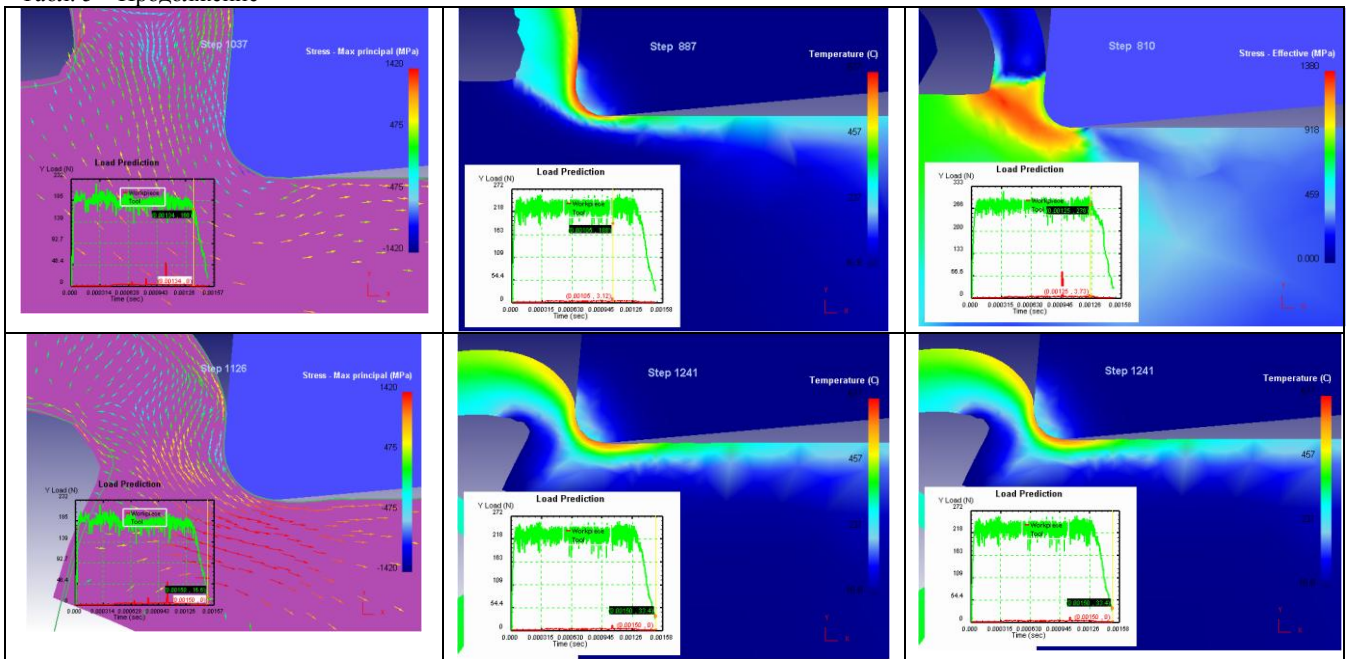


Табл. 5 – Продовження



Другим важным показателем качества обработки зубчатого колеса, обеспечивающим соответствие служебному назначению, достижение которого связано с значительными затратами при выполнении предварительной и окончательной обработки, является обеспечение качества поверхностного слоя, которое заключается в достижении требуемого качества как самого поверхностного слоя, так и прилегающего к поверхности слоя материала.

Последовательность моделирования формирования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho=0,160; 0,180; 0,300$  мм приведена в табл. 6.

Зубчатые колеса работают в условиях высокого контактного воздействия, воспринимают большие знакопеременные и реверсивные нагрузки. Поверхностный слой зубьев зубчатых колес характеризуется макроотклонениями, волнистостью, шероховатостью, субшероховатостью, адсорбированной зоной, зоной оксидов, граничной зоной материала, зоны материала с измененными физико-химическими свойствами.

Использование разработанного технологического регламента по выбору и назначению параметров обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя зубчатых колес устанавливает оптимальные условия резания, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска всех зубьев фрезы.

Последовательность моделирования формирования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho=0,350; 0,400; 0,450$  мм приведена в табл. 7.

Определение минимальных углов скольжения при обработке зубчатых колес методом фрезерования, исходя из физико-химических процессов механики трения, позволяет значительно повысить эффективность процесса формирования зубьев и эксплуатац

онные свойства их поверхностей [1, 3, 5].

Между остаточным напряженным состоянием поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес и напряженно-деформированным состоянием в зоне формообразования устанавливается весьма простая зависимость. С допущением полагая в зоне стружкообразования деформацию плоской, имеем

$$e_y = e_2 \cdot \cos 2\omega,$$

где  $e_2$  - вторая главная деформация;  $e_z$  - деформация в направлении вектора скорости резания;  $\omega$  - угол между направлениями  $e_2$  и  $e_z$ .

Поскольку при резании деформация  $e_2$  величина отрицательная, то при угле наклона ее траектории (линии трещины) меньше  $45^\circ$  деформация в тангенциальном направлении  $e_z$  будет сжимающей, а остаточные напряжения в этом направлении соответственно растягивающими.

Известно, что при начальном врезании зуба фрезы в поверхностном слое появляется текстура (рис. 3), направление которой совпадает с главной осью деформации растяжения. Если учесть, что в непосредственной близости от режущей кромки это направление сохраняется и в поверхностном слое, то знак остаточных напряжений будет связан и с углом текстуры  $\Phi_2$ , так как  $\omega = 90^\circ - \Phi_2$ . Отсюда вытекает, что при  $\Phi_2 < 45^\circ$  следует ожидать остаточные напряжения сжатия (рис. 3), а при  $\Phi_2 > 45^\circ$  - остаточные напряжения растяжения (рис. 4).

В результате по этим направлениям наряду с нормальными компонентами появляется и касательная. Касательные остаточные напряжения, как и нормальные (тангенциальные и осевые) могут быть и положительными, так и отрицательными (табл. 8), а их величина, естественно, тем больше, чем больше угол отклонения главных осей от направления формообразующих движений на угле скольжения зуба фрезы  $\Psi_{ск}$ .

Таблиця 6 - Последовательность моделирования формообразования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho=0,160; 0,180; 0,300\text{мм}$

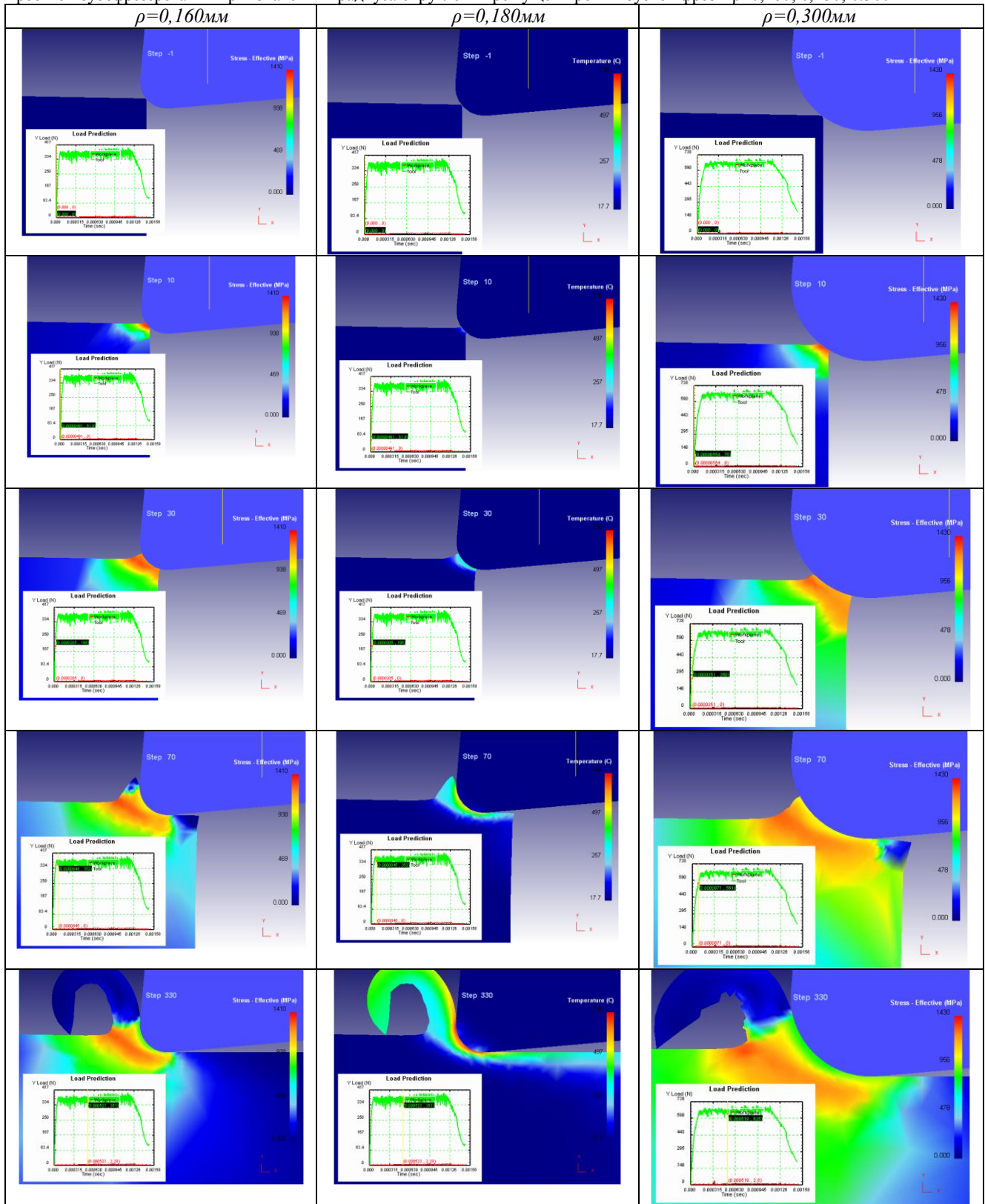




Табл.6 – Продолжені

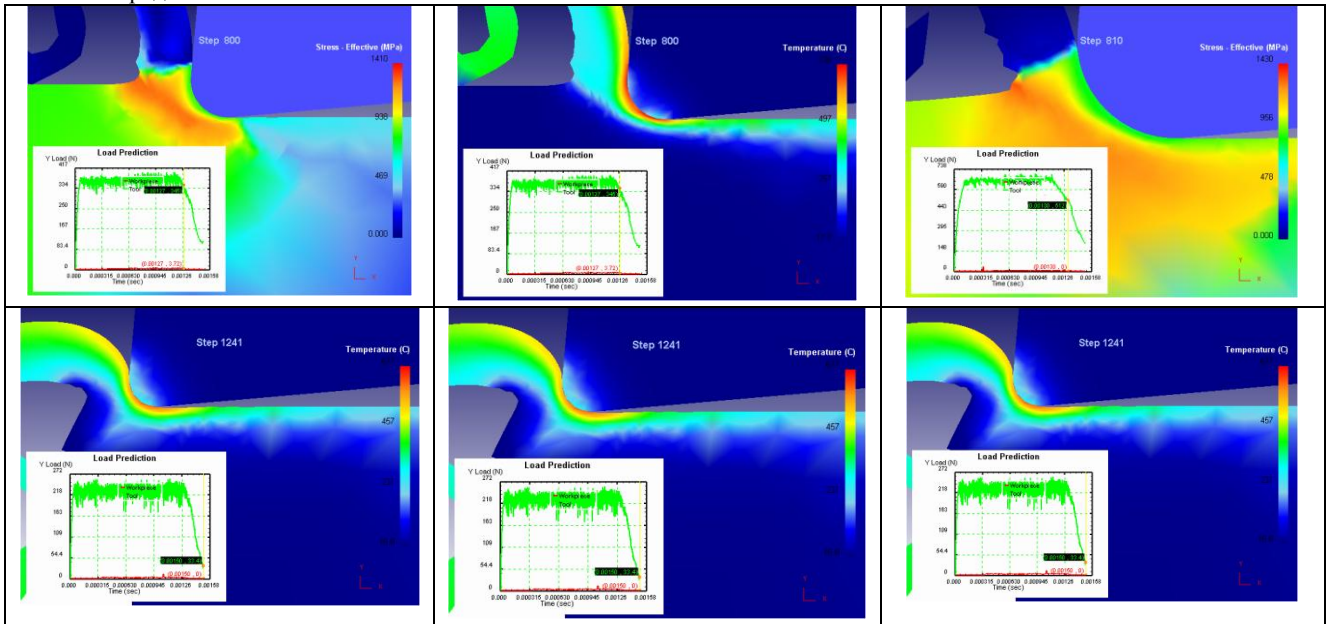


Таблица 7 - Последовательность моделирования формообразования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho=0,350; 0,400; 0,450\text{мм}$

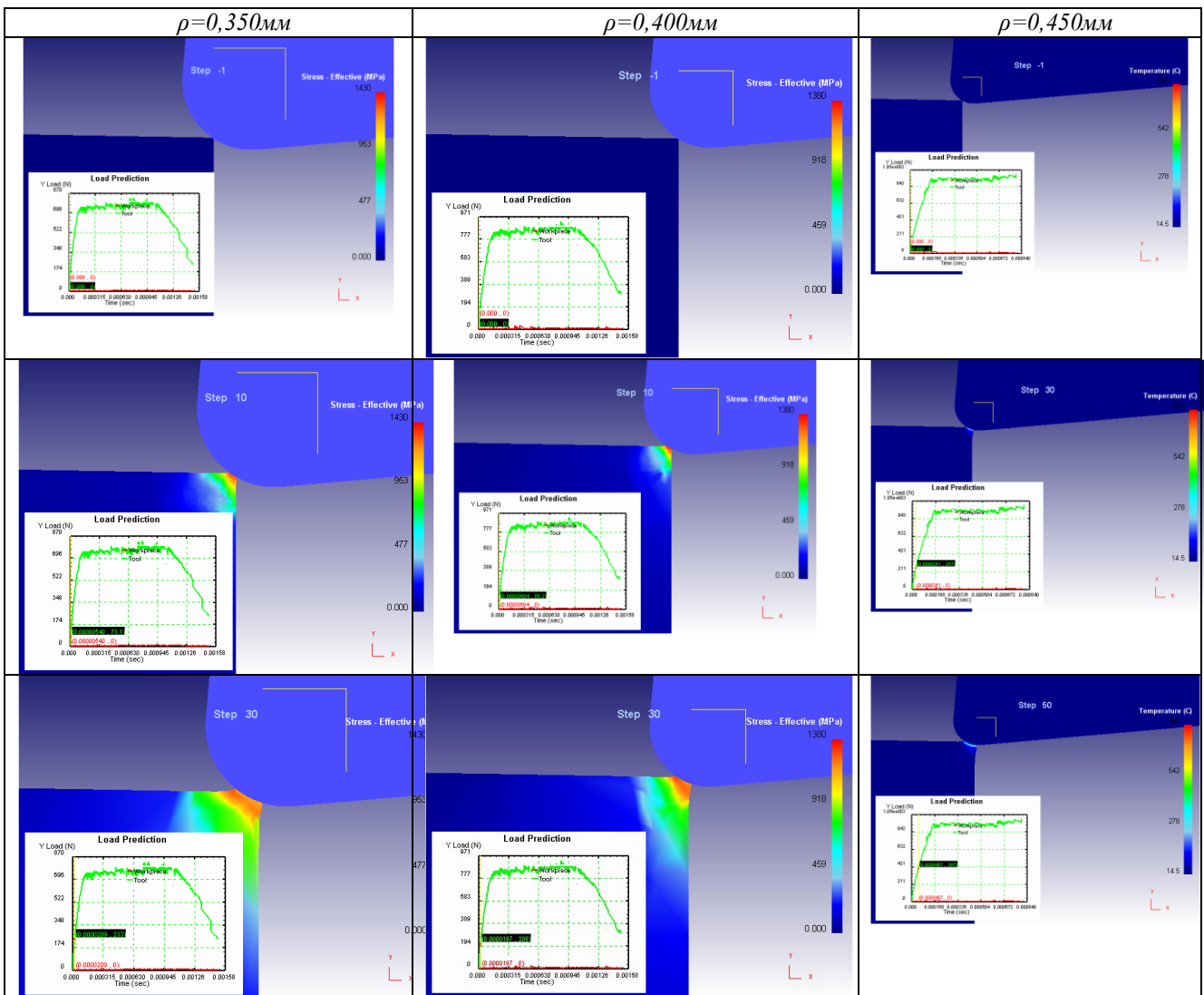


Табл.7 – Продолжени

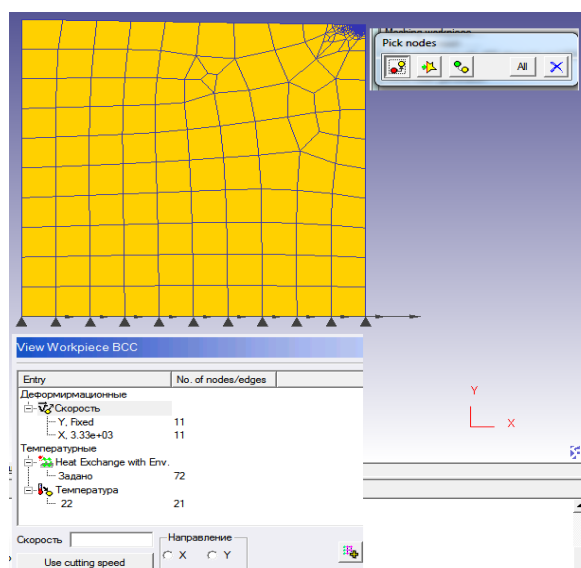
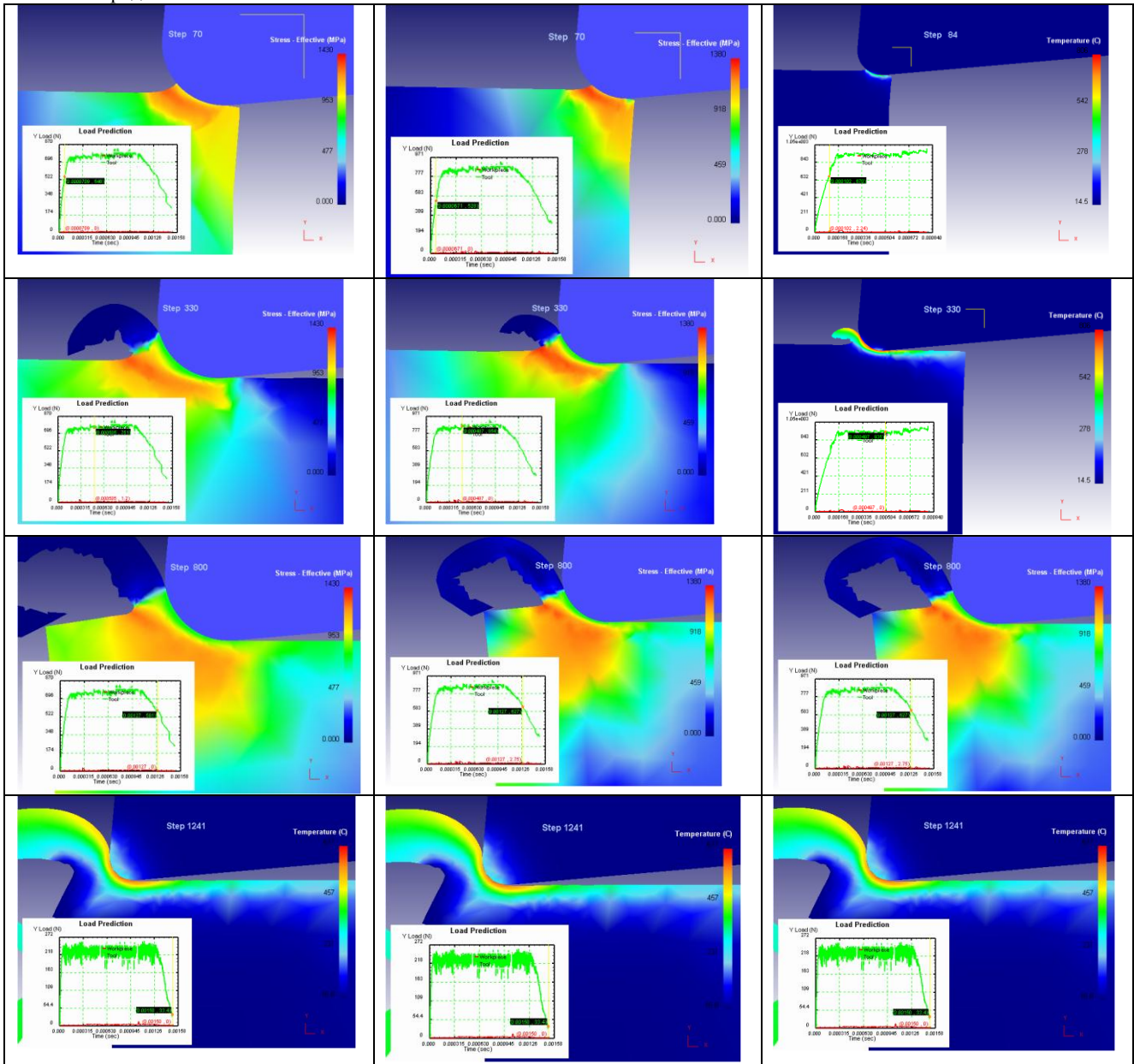
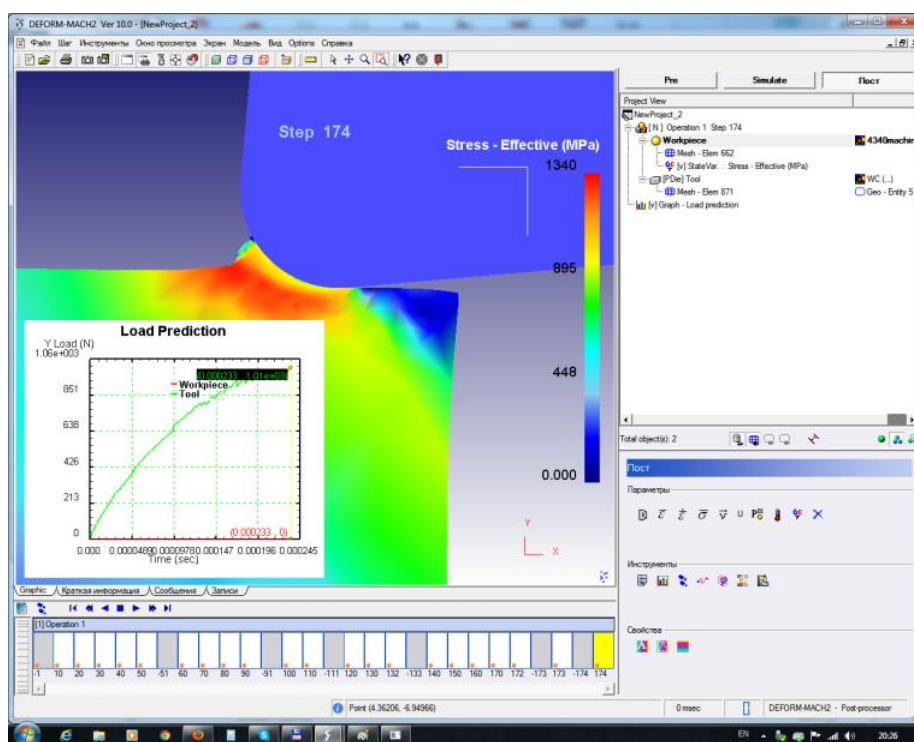


Рис. 3 – Остаточные напряжения сжатия при начальном врезании зуба фрезы

Таблица 8 - Знаки тангенциальных остаточных напряжений, определенные по углу текстуры стружки и экспериментально при скоростном зубофрезеровании стали 34ХНМ

Скорость резания, м/с	Наибольшая толщина среза а, мм	Радиус округления режущей кромки зубьев фрезы	Угол текстуры ЛЧ® W	Знак остаточных напряжений	
				по текстуре	эксперим,
0,2	0,73	0,08	54	+	+
	0,44	0,12	48	+	+
	0,6	0,14	57	+	+
	0,15	0,16	51	+	+
1,0	0,31	0,14	51	+	+
	0,36	0,16	58	+	+
2,0	0,27	0,16	66	+	+
	0,23	0,18	56	+	+
	0,24	0,30	48	+	+
3,0	0,34	0,35	61	+	+
	0,32	0,40	52	+	+
	0,12	0,45	49	+	+

Рис. 4 – Остаточные напряжения при начальном врезании зуба фрезы на угле скольжения  $\Psi_{ск}$ 

Примечательно, что, как установлено экспериментально, на угле скольжения зуба фрезы при врезании образуются значительные растягивающие напряжения в поверхностном слое отклонения и по мере увеличения угла скольжения при переходе упругих деформаций в пластические-уменьшаются.

Непосредственная связь между напряжениями, возникающими в зоне стружкообразования, и остаточными напряжениями может быть показана при их представлении интенсивностью напряжений, характеризующей напряженное состояние в обобщенном виде. Эта связь выражается более четко, если остаточные напряжения оценивать площадью активной части

их эпюр. Происходит сглаживание погрешностей определения остаточных напряжений, присутствие которых неизбежно из-за сложности эксперимента.

**Выводы 1.** Основным фактором, определяющим характер остаточного напряженного состояния поверхностного слоя изделия, является поле напряжений, создаваемое передней поверхностью инструмента с учетом радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho$ .

2. Ориентация траекторий главных деформаций, идущих от зоны стружкообразования за линию среза, определяет знак образующихся остаточных напряжений, а интенсивность напряжений в зоне стружкооб-

разования - интенсивность остаточных напряжений и степень упрочнения поверхностного слоя. Тем самым обуславливается взаимосвязь между остаточными напряжениями и показателями упрочнения.

3. При зубофрезеровании главные оси поля остаточных напряжений не совпадают с направлениями формообразующих движений, что требует характеризовать остаточное напряженное состояние или двумя нормальными компонентами, ориентированными по направлениям формообразующих движений, и касательной компонентой, или двумя главными компонентами и углом их отклонения от направлений формообразующих движений.

4. Экспериментальные исследования показали довольно тесную корреляционную связь между собой высотных параметров шероховатости  $R_a$ ,  $H_p$  – высоты сглаживания макроотклонения,  $W_p$  – высоты сглаживания профиля волнистости,  $R_z$  – высоты неровностей профиля по десяти точкам,  $S_m$  – среднего шага неровностей. Моделирование последовательности формирования поверхностного слоя цилиндрических закаленных зубчатых колес регламентируется исходными технологическими параметрами.

5. Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя зубчатых колес устанавливает оптимальные условия зубофрезерования, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска при зубофрезеровании всех зубьев фрезы. Технологический регламент выбора и назначения параметров зубообработки разработан на научной основе технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических, закаленных зубчатых колес.

6. Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании гарантирует:

- обеспечение высокой производительности при максимальной стойкости инструмента;
- технологическое обеспечение параметров поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при максимальной обрабатываемости;
- высокую технологическую стабильность зубообрабатывающего оборудования, дорогостоящего инструмента при обработке цилиндрических зубчатых колес.

#### Список литературы

Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск: ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3.  
 Клочко А. А. Технологические основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / А. А. Клочко, А. Н. Кравцов; Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.: ил., табл.; -

(Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). ISBN 978-5-906703-02-6.

Литвинов В.М. Технологические особенности спрейерной закалки крупногабаритных зубчатых колес в тяжелом машиностроении / В.М. Литвинов, Е.В. Мироненко, А.Н. Шелковой, М.И. Гасанов, А.А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – Вып. 38. – С. 51–59.

Суслов А. Г. Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин [Текст] / А. Г. Суслов; Под ред. И. М. Корсаковой // – М.: Издательство МГИУ, 2010. – с. 111.

Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 1: учеб. пособие / А.В. Беловол, А.А. Клочко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин, А.Н. Шелковой. под редакцией А.Н. Шелкового // □ X.: НТУ «ХПИ», 2016. □ 400 с. □ На русском языке. ISBN 978-966-593-749-4.

Логіко-лінгвістичне моделювання взаємозв'язку функціональних характеристик системи дрібносерійного виробництва з параметрами процесу складання / О.М. Шелковий, О.О. Клочко, Л.Б. Шрон, А.О. Скоркин, О.Л. Кондратюк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. – Вып.67. – С. 94-100.

Добротворський С. С. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей / С. С. Добротворський, Є. В. Басова та ін. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: збірник наукових праць. – 2015. – № 822. – С. 7–13.

#### References (transliterated)

1. Kluchko A.A. [et al.]. Technological bases of coarse-grained gear treatment hardened gears: monograph / - Kramatorsk: DGMA, 2014. - 479 p. ISBN 978-966-379-667-3.
2. Kluchko A.A., Kravtsov A.N. technological foundations for coarse-grained gear treatment process hardened gears [text]; Donbass State Engineering Academy; Closed Joint-Stock in the "ONYX" - Kramatorsk: DGMA; Irbit: ONYX, 2014 - 299 p.: silt.; Table. - (.. Series: "The design and application of cutting tools in the engineering industry" / Com Ed YM Solomentsev). ISBN 978-5-906703-02-6.
3. Litvinov, V.M., Mironenko E.V., Shelkova A.N., Gasanov M.I., Kluchko A.A. Technological features spreyonny hardening of large gears in heavy engineering. The reliability of the instrument and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2016. - Vol. 38. - pp. 51-59.
4. Suslov A.G. Assigning, marking and control of roughness surfaces of machine parts [Text] - M.: Publisher MGIU, 2010. - p. 111.
5. Belovol A.V., Kluchko A.A., Naboka E.V., Skorkin A.O., Shelkova A.N. Simulation modeling in problems of machine-building production in 2 volumes, Volume 1: studies. allowance. Kharkov.: NTU «KPI», 2016. 400p. In Russian. ISBN 978-966-593-749-4.
6. Shelkova A.N., Kluchko A.A., Shron L.B., Skorkin A.O., Kondratyuk O.L. Logiko-lingvistichne modelyuvannya vzaimozv'yazku funktsionalnih system characteristics dribnoseriynogo виробництва s parameters skladannya processes. Public information and computer integrated technologies: Sat. scientific. tr. - Kharkov/ Nat. aerokosm. Univ "HAI", 2015. - Vyp.67. - pp. 94-100.
7. Dobrotvorsky S.S., Basova E.V., et. Komp'yuterne proektuvannya ta modelyuvannya tehnologichny'x procesiv vy' sokoshvy'dkiskogo frezeruvannya zagartovany'x [Computer design and simulation processes high-speed milling hardened steels] Visnyk Nacional'nogo universy'tetu «Lviv'ska politexnika». Seriya: Opty'mizaciya vy'robny'chy'x procesiv i technichny'j kontrol' u mashynobuduvanni ta pry'-ladobuduvanni : zbirnyk naukovy'x prac'. 2015. No 822. pp. 7–13.

Поступила (received) 12.10.16

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технологічний регламент вибору і призначення параметрів стану поверхневого шару загартованих зубчастих коліс / О. О. Клочко, М. І. Гасанов, Є.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

**Технологический регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес / А. А. Клочко, М. И. Гасанов, Е.В. Басова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X

**Production schedules the selection and appointment of the surface layer state parameters of hardened gears / A.A. Klochko, M. I. Hasanov, E.V. Basova** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.112–116. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Клочко Олександр Олександрович** – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: klochko21@rambler.ru .

**Клочко Александр Александрович** – доктор технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический университет», г. Харьков; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: klochko21@rambler.ru .

**Klochko Alexander Alexandrovich** - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politechnichemkty University" Kharkiv; tel .: (057) 707-66-25; e mail: klochko21@rambler.ru.

**Гасанов Магамед Иса** – проректор, канд. технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (057) 707-66-25;

**Гасанов Магамед Иса** – проректор, канд. технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический университет», г. Харьков; (057) 707-66-25;

**Hasanov Mahammad Isa** - Candidate of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politechnichemkty University" Kharkiv; tel .: (057) 707-66-25;

**Басова Євгенія Володимирівна** – канд. технічних наук, доцент кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

**Басова Евгения Владимировна** – канд. технических наук, доцент кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический университет», г. Харьков; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

**Basova Evgenia Vldimirovna**- Candidate of Technical Sciences, Docent of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25; e-mail: evgeniya.ivaschenko@mail.ru.

УДК 621.039.57

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Б.А. АЛЕКСЕНКО, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

## АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДСОРБЦИОННЫХ ОСУШИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ ОБОРУДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ

Проведене практичне експериментальне дослідження впливу якості стислого повітря, використовуваного для формування плазмового струменя в процесі плазмового різання сталі з застосуванням неактивного газу. У зв'язку з широким поширенням технології плазмового різання в сучасному промисловому виробництві вказана технологія потребує вдосконалення з метою підвищення якості виробленої продукції та зниження виробничих витрат підприємства. Результат дослідження показав необхідність застосування адсорбційних осушувачів в процесі підготовки повітря для апаратів плазмової різки.

**Ключові слова:** плазмова різка, осушувач, стисле повітря, вологовміст, адсорбція, регенерація.

Проведено практическое экспериментальное исследование влияния качества сжатого воздуха, используемого для формирования плазменной струи в процессе плазменного резания стали с применением неактивного газа. В связи с широким распространением технологии плазменной резки в современном промышленном производстве указанная технология нуждается в совершенствовании с целью повышения качества производимой продукции и снижения производственных затрат предприятия. Результат исследования показал необходимость применения адсорбционных осушителей в процессе подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки.

**Ключевые слова:** плазменная резка, осушитель, сжатый воздух, влагосодержание, адсорбция, регенерация.

A practical experimental study of the influence of the quality of the compressed air used to form the plasma jet in the process of plasma cutting steel with an inactive gas. Due to the wide spread of technology of plasma cutting in modern industrial manufacturing technology is an indication that needs to be improved in order to improve product quality and reduce production costs of the enterprise. The results showed the need for adsorption dryers in the process of preparing for air plasma cutting machines.

**Keywords:** plasma cutting, dryer, compressed air, moisture, adsorption, regeneration.

**Введение.** Сжатый воздух получает все большее распространение в промышленности как источник энергии, являясь одним из основных источников энергии на большинстве промышленных предприятий.

В настоящей публикации применение сжатого воздуха будет рассмотрено с позиции его непосредственного участия в технологическом процессе плазменной резки.

**Анализ последних исследований и литературы.** Обзор работ и исследований по поставленной тематике свидетельствует о том, что основное внимание разработчиков и производителей оборудования плазменной резки уделяется проблеме подбора параметров источника тока и разработкам, посвященным выбору материалов, используемых при производстве режущих сопел. При этом, проблеме очистки и осушки сжатого воздуха, используемого при создании плазменной струи уделяется недостаточно внимания, как в области теоретических исследований, так и на практике.

**Целью** данной статьи является изучение характера влияния параметров сжатого воздуха, используемого в процессе плазменной резки стали, в частности, такого параметра как влагосодержание, на качество реза, производимого плазменным оборудованием.

**Постановка проблемы.** В настоящей работе была рассмотрена проблема подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки, показана необходимость применения для этих целей осушителей адсорбционного типа, экспериментально была прослежена зависимость качества реза от влажности подводимого сжатого воздуха на аппарате плазменной резки, с техническими характеристиками, соответствующими условиям проведения эксперимента (см. табл. 1.), а

также указаны основные требования, предъявляемые к адсорбционным осушителям, используемым для обеспечения воздухом аппаратов плазменной резки.

**Материалы исследований.** Качество работы аппарата плазменной резки можно оценить по таким параметрам как скорость и чистота реза, скос кромки реза, значение минимального размера точки входа.

Угол скоса кромки и размер точки входа являются определяющими при раскрое разрезаемой заготовки, позволяя значительно экономить обрабатываемый материал, особенно при большой (10 ... 40 мм) толщине разрезаемой заготовки и вариантах раскроя с большим количеством «вложенных» деталей.

На практическом примере раскроя заготовок под фланцы согласно ГОСТ 12820-80 (стандарт распространяется на стальные приварные плоские фланцы для соединительных частей и трубопроводов, таким образом, можно справедливо считать данные изделия одними из наиболее распространенных, по меньшей мере, в котельном оборудовании) возможно проследить важность упомянутых параметров резания.

Так, при диаметре внутреннем фланца 1-125-10, равном 135 мм и диаметре внешнем фланца 1-25-10, равном 115 мм, расстояние между заготовками при симметричном позиционировании вложения составляет  $(135-115)/2=10$  мм. Если принять толщину реза равной 5 мм, то максимально допустимый скос кромки реза при раскрое листа толщиной (согласно ГОСТ 12820-80) 25 мм не может превышать  $6^\circ$ , поскольку в противном случае чистовая токарная обработка заготовок не перекроет зарезы, оставленные на заготовке плазменной струей (рис. 1).

Также следует учитывать, что точка входа плазменной струи превышает размерами толщину реза в 1,5 ... 2 раза, поэтому современные аппараты плазменной резки, как правило, не разрешают симметрич-

© С.С. Добротворский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская, 2016

ное позиционирование вложения так, как описано в приведенном примере: учитывая необходимость врезки, программа-раскройщик принудительно смещает «вложенную» деталь, увеличивая, тем самым, расстояние между заготовками в точке врезки и, соответственно, сближая детали на 5 ... 10 мм по оси расположения врезки.

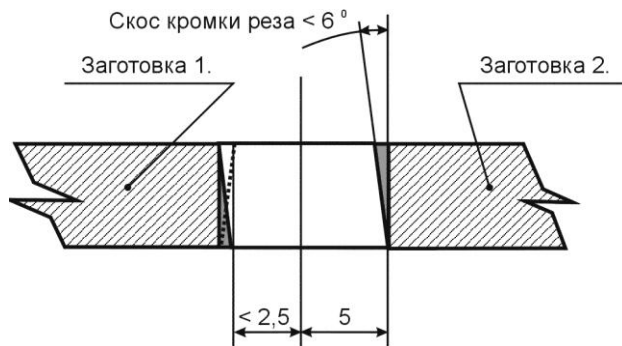


Рис. 1 – Скос кромки плазменного реза

Таким образом, при принятой ранее толщине реза, равной 5 мм, наклон плазменной струи не допускается вовсе, а скос кромки обрезаемой детали (даже принимая во внимание последующее снятие фасок в процессе чистовой токарной обработки заготовок) не должен превышать  $1^{\circ}$ .

Получить такие четкие характеристики плазменной резки на практике очень сложно, при этом следует учитывать все факторы, влияющие на качество реза, подбирать и четко выдерживать все параметры работы оборудования. И если выбор таких параметров, как напряжение и сила тока резания, может осуществляться персоналом в широких пределах и оперативно подстраиваться оборудованием автоматически, то качество воздуха возможно улучшить только лишь путем доукомплектования установки плазменной резки специальным оборудованием воздухоподготовки.

Таким образом, игнорирование требований к качеству воздуха и неиспользование оборудования его подготовки, в приведенном примере, может существенно увеличить затраты предприятия, увеличив отход материала и приведя к необходимости приобретения дополнительного материала специально под изготовление фланцев меньшего типоразмера.

Практическое же использование аппаратов плазменной резки в местных условиях эксплуатации свидетельствует о том, что проблеме подготовки воздуха уделяется недостаточно внимания.

При отработке технологии авторам приходилось сталкиваться с такими ситуациями, когда в шланге плазмореза наблюдалось накопление ливневой влаги. Такое обильное конденсирование жидкости сопровождается характерными звуками в сопле и приводит к резкому ухудшению качества реза, вплоть до срыва плазменной струи. Обслуживающий персонал отечественных предприятий научился бороться с указанной проблемой, применяя недорогие фильтры, в том числе изделия бытового назначения и конструкции соб-

ственного производства. Такие меры способны обеспечить принципиальную работоспособность резака, но лишь при условии его эксплуатации в летний период или в хорошо отапливаемом помещении, при этом вопрос о качестве реза вообще не ставится.

В тех случаях, когда предприятие эксплуатирует свое плазменное оборудование в штатных режимах, обращая внимание на качество выпускаемой продукции и стремясь реализовать все возможности оборудования плазменной резки в полном объеме, оно неизбежно приходит к выводу о невозможности качественно подготовить воздух с использованием исключительно фильтрующих технологий или рефрижераторных осушителей. Так, при выходе из сопла воздуха, подготовленного даже по 4 ... 5 классу загрязненности, неизбежно происходит образование влаги из-за разницы давления в сопле и последующего доохлаждения воздуха на его выходе. Практикой действительно подтверждается, что на выходе из сопла даже хорошо отфильтрованного воздуха будет образовываться влага.

Следует также отметить то, что качественная подготовка воздуха на несколько процентов повышает скорость резания. Это не является определяющим фактором, однако, при интенсивном использовании предприятием оборудования плазменной резки, способно принести ощутимый экономический эффект.

На необходимости применения осушителей, способных очищать воздух до 1 ... 2 классов загрязненности настаивают и производители аппаратов плазменной резки. Как пример, можно привести фрагмент публикации фирмы Thermal Dynamics о повышении срока службы расходных деталей в части, касающейся качества газов:

Производители часто рекомендуют использовать для плазменной резки "Сухой и Чистый" газ. Посторонние загрязняющие вещества могут снизить эффективность резки так как критически важные газовые каналы будут засорены. Эти каналы существуют в соплах и в "завихрителях газа" и они имеют одно из ключевых значений для рабочих характеристик плазменной системы.

Если подаваемый газ влажный или "мокрый", то это приводит к появлению загрязняющих веществ на поверхностях расходных деталей. Это вызвано тем, что вода под воздействием высокой температуры испаряется и оставляет отложения. Обычно Вы можете найти это на электроде и на внутренней поверхности сопла. Вред, наносимый влагой в первоначальный момент, появляется на электроде в насечках для "завихрения" газа. В дальнейшем, при эксплуатации, электрод покрывается черным налетом и в конечном итоге производительность будет снижена. Когда это произойдет, расходные детали должны быть заменены.

Таким образом, можно сделать вывод, что износ указанных комплектующих частей ускоряется не только и не столько по причине низкой квалификации персонала или резки толстых листов металла с использованием интенсивных режимов, сколько из-за повышенной влажности плазмообразующего воздуха.

Однако, как было показано на конкретном примере раскроя заготовок для изготовления фланцев, основная функция устройства осушки воздуха – это не только и не столько снижение износа комплектующих, сколько кардинальное повышение качества реза, что дает, в ряде случаев, колоссальную экономию материала и значительный рост производительности режущего оборудования.

Учитывая вышесказанное, в процессе экспериментального исследования влияния влажности

сжатого воздуха на качество реза было принято решение об использовании в качестве устройства подготовки воздуха осушителя адсорбционного типа, способного обеспечить воздухоподготовку до 1 класса по DIN ISO 8573-1. При этом, с целью обеспечения возможности получения экспериментальных данных, адсорбер осушителя был укомплектован блоком управления ТДС-5, позволяющим варьировать влагосодержание сжатого воздуха на входе в аппарат плазменной резки в пределах  $10,0 \dots 0,003 \text{ г/м}^3$ , что соответствует температуре точки росы в рамках от  $+10^0 \text{ С}$  до  $-70^0 \text{ С}$  и, соответственно, классам загрязненности от 6 до 1 (см. табл. 1).

Таблица 1 – Влагосодержание согласно классов загрязненности

Класс очистки	Максимальное остаточное содержание влаги	
	$\text{г/м}^3$	точка росы сжатого воздуха, $^{\circ}\text{С}$
1	0,003	-70
2	0,117	-40
3	0,88	-20
4	5,953	+3
5	7,732	+7
6	9,356	+10

В качестве обрабатываемого материала был использован лист металла  $1500 \times 4000 \times 16$ , сталь 3. Согласно раскроя (см. рис. 2.), было выполнено 159,2 м погонных реза с 442 точками врезки, при различных параметрах влажности подаваемого сжатого воздуха (см. табл. 2.).

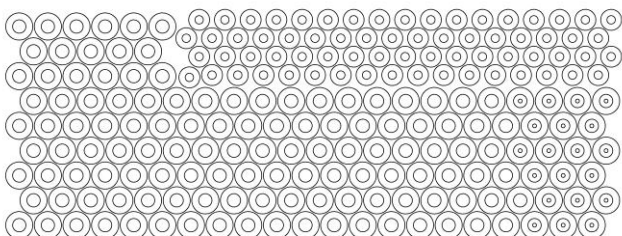
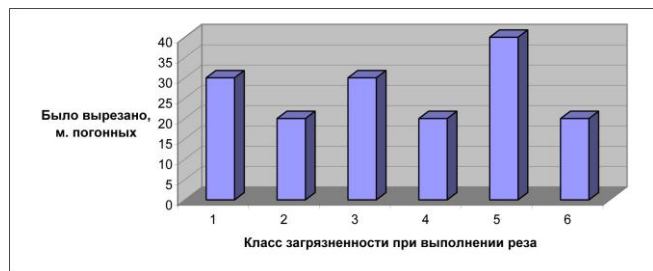


Рис. 2– Раскрой листа металла в ходе выполнения экспериментальной резки

Прочие параметры резания были выбраны ПО оборудованием автоматически и в ходе эксперимента не изменялись.

Таблица 2 – Длины выполненных резов при заданом классе загрязненности



Экспериментально проследить зависимость изменения скорости реза от параметров сжатого воздуха, по условиям проведения описываемого эксперимента, также технической возможности не представлялось.

**Результаты исследования.** В результате проведенного эксперимента была прослежена зависимость изменения угла скоса кромки реза от влажности подаваемого сжатого воздуха, отображенная на графике (рис. 3.).

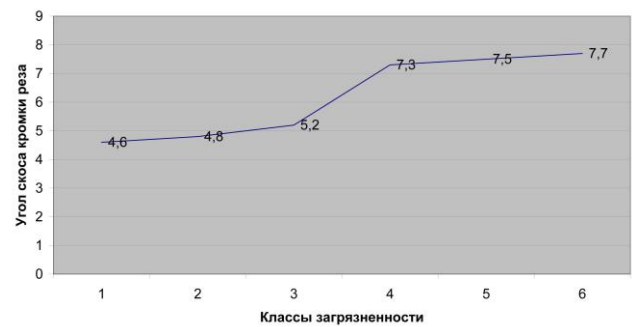


Рис. 3 – Зависимость угла скоса кромки реза от класса загрязненности используемого воздуха

Оценка зависимости угла скоса кромки реза от влажности подаваемого сжатого воздуха проводилась в процессе чистовой токарной обработки изделий. При этом, скос кромки определялся из значения максимальной конусности круглого реза, рассчитывавшегося, в свою очередь, как разность координаты положения касания резцом заготовки и положения резца, при котором на поверхности заготовки наблюдалось полное отсутствие следов плазменной резки (по условиям эксперимента вырезались детали цилиндрической формы, рис. 2.). Угол скоса кромки реза в градусах определялся по значению тангенса полученного соотношения хода резца к толщине разрезаемой заготовки (16 мм).

На приведенном графике зависимости угла скоса кромки реза от влажности используемого воздуха (рис. 3.) представлены усредненные значения полученных данных.

Заметное резкое повышение качества реза при переходе с 4 к 3 классу загрязненности, (рис. 3.) авторами объясняется как возможной погрешностью эксперимента, так и значительным изменением влагосодержания (с  $5,953$  до  $0,88 \text{ г/м}^3$ ) при снижении влажности с температуры точки росы  $+3$  до  $-20^0 \text{ С}$ .



В результате имеющегося опыта можно констатировать тенденцию повышения качества реза оборудованием плазменной резки при снижении влажности подаваемого сжатого воздуха и сделать вывод, что оборудование плазменной резки нуждается в воздухе с большей степенью очистки, чем та, которую способны обеспечить простые устройства воздухоподготовки типа циклонных очистителей и фильтров. К такому оборудованию относятся, как было показано выше, аппараты ручной и автоматической плазменной резки.

В указанных случаях требуется использование осушителей именно адсорбционного типа, способных обеспечить снижение точки росы до  $-70^{\circ}\text{C}$ .

**Практические разработки.** Технология глубокой осушки воздуха с применением эффекта адсорбции влаги поверхностным слоем гранулированного мелкопористого адсорбирующего материала широко применяется в промышленности и по эффективности превосходит технологию доохлаждения осушаемого газа с использованием рефрижераторных охладителей, способную обеспечить лишь 4-й класс загрязненности по остаточному содержанию влаги.

По принципу работы адсорбционные осушители подразделяются на установки, использующие принцип короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА) и установки с горячей регенерацией адсорбента. Осушители, функционирующие по принципу короткоциклового безнагревной адсорбции, получили распространение как более простые, недорогие и надежные, в отличие от сложных и дорогих осушителей с горячей регенерацией.

Процесс глубокого осушения (до значения температуры точки росы  $-70^{\circ}\text{C}$ ) происходит с потерей энергии. Так, потери установок КБА составляют до 20 % осушаемого сжатого воздуха, а дорогостоящие установки с горячей регенерацией потребляют помимо сжатого воздуха и значительное количество электроэнергии, большая часть которой, фактически, расходуется на нагрев окружающей среды.

На рынке имеются различные типы устройств воздухоподготовки, причем применение дорогостоящих импортных устройств не гарантирует эффективного решения проблемы подготовки воздуха. Так, приобретение предприятием устройства воздухоподготовки даже зарекомендовавшей себя солидной марки не гарантирует эффективной работы данного устройства в конкретных условиях эксплуатации. Это вызвано прежде всего особенностями выходных параметров компрессорных станций, отличиями в конструкции отечественных воздухопроводов, недостаточной корректной эксплуатацией устройств воздухоподготовки и систем дренирования рабочим персоналом.

Особенностью эксплуатации устройств плазменной резки является непостоянство расхода сжатого воздуха, обусловленное необходимостью периодических отключений для установки разрезаемого листа и снятия готовых заготовок, существенным различием траекторий движения резака, толщиной обрабатываемых материалов и т. д. Поэтому вполне естественным является желание предприятий, эксплуатирующих

плазменные резаки, снабдить свое оборудование осушителями, способными максимально гибко и оперативно подстраиваться под конкретные условия энергопотребления, обеспечивая в нужный момент времени требуемый расход воздуха на данном потребителе.

Учитывая указанное требование, авторами были разработаны и внедрены адсорбционные осушители типа ТДС, особенностью которых является то, что режим работы ТДС может изменяться встроенным активным измерителем влажности по оригинальному алгоритму, что позволяет как задавать требуемую глубину осушки (к примеру, от 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$  в летний период и от  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $-70^{\circ}\text{C}$  в зимний), так и максимально быстро и без участия обслуживающего персонала реагировать на изменения расхода на потребителе сжатого воздуха. В случае временного прекращения потребления на выходе, осушитель ТДС автоматически переходит в режим задержки потребления, прекращая потерю сжатого воздуха на регенерацию, что значительно снижает непроизводительные потери сжатого воздуха.

Также к требованиям, предъявляемым к осушителям, снабжающим воздухом оборудование плазменной резки, можно отнести ограничения по габаритам и весу адсорбционных установок, что особенно актуально для случаев, когда установка плазменной резки представляет собой агрегат (тем более, мобильный), включающий в себя помимо непосредственно источника электрического тока, также и воздушный компрессор с устройствами воздухоподготовки.

К сожалению, в настоящее время в мировой практике неизвестны конструкции адсорбционных осушителей, позволяющие добиться заметного уменьшения габаритов и снижения веса изделия, по сравнению с осушителями общепринятой конструкции. Поскольку адсорберы, в большинстве случаев, представляют собой стационарное оборудование, вопрос о повышении мобильности этих устройств не являлся центральным в процессе рассмотрения путей совершенствования конструкции данного типа оборудования. Тем не менее, столкнувшись с необходимостью готовить качественный воздух для мобильных потребителей, в частности, передвижных устройств плазменной резки, авторами были намечены пути повышения интенсивности работы адсорбционных осушителей при сохранении их массогабаритных характеристик.

Адсорбционный осушитель, независимо от типа регенерации, функционирует циклически, при этом процесс включает в себя как этап собственно адсорбции (рабочий), так и этап регенерации адсорбирующего вещества (вспомогательный), эффективность которого оказывает значительное влияние на производительность адсорбционного осушителя. В практике постройки адсорбционных осушителей используются методы удаления влаги из адсорбента (просушки) путем обдува его предварительно нагретым, либо предварительно осушенным воздухом. При этом энергия, необходимая для осуществления процесса регенерации тратится на повышение влагоёмкости продувочного воздуха и, практически, технологиче-

ски ограничена и не может быть значительно увеличена с целью интенсификации процесса регенерации.

Таким образом, с целью повышения эффективности работы адсорбционных осушителей, снижения их веса и уменьшения размеров, в том числе, для использования в мобильных агрегатах, потребовалось увеличить интенсивность регенерации заданного объема адсорбирующего вещества путем внесения дополнительных видов энергии на этапе регенерации. Работы в этом направлении носят экспериментальный характер и осушители компактной конструкции в настоящее время на отечественных производственных предприятиях не внедряются.

Еще одним требованием, предъявляемым оборудованием плазменной резки с ЧПУ, является повышенная надежность оборудования воздухоподготовки, что вызвано невозможностью программы повторно стартовать и продолжить рез с координаты аварийной остановки сопла. Таким образом, аварийная остановка приводит к неизбежной порче заготовки и необходимости приобретения дополнительной партии обрабатываемого материала.

Таблица 3 – Параметры установки плазменной резки, использованной при проведении эксперимента

Параметр	Значение
Перемещение сопла max, мм	
-продольное	6080
-поперечное	1520
Пределы подачи, мм	
-продольный	0 ... 6500
-поперечный	0 ... 6500
Размер заготовки max, мм	1500 ... 6000
Точность поверхности по ГОСТ 14792-80	2 – 3 кл.
Точность позиционирования, мм	0,1
Размер выреза, min	10
Точность воспроизведения контура по ГОСТ 5614-74	+/- 0,35
Источник плазмы	Инверторный 140 А. Режим ПВ 100 %
Толщина max разрезаемой заготовки, мм	35
Тип разрезаемого материала: углеродистые, легированные и специальные стали, в т. ч. нержавеющей, цветные металлы.	

В целях повышения надежности производимых осушителей ТДС, авторами был разработан и внедрен комплекс мер по обеспечению безотказности конструкции, включая снижение чувствительности осушителя к несоответствию входных параметров воздуха и электропитания необходимым и к случаям некорректного обслуживания оборудования персоналом. Также в конструкции осушителей ТДС был впервые использован принцип полистабильности

управляющей системы с применением кватростабильного электропневмодрайвера, физически исключая такое положение арматуры осушителя, при котором потребление на осушителе может быть прекращено, даже в случае отключения осушителя от источника электропитания.

**Выводы.** Процесс плазменной резки получает все более широкое распространение и интенсивно внедряется на машиностроительных предприятиях, заменяя собой механическое резание, по причине множества явных и неоспоримых преимуществ, таких, как возможность резания деталей со сложной геометрической формой, высокое качество поверхности реза, невысокая температура нагрева разрезаемой заготовки, исключая деформацию заготовки и закалку кромки реза, безопасность процесса резания, высокая скорость резания, возможность обработки любых металлов, в том числе цветных и тугоплавких, сравнительная легкость автоматизации процесса резания. При этом установлено, что плазменное оборудование предъявляет ряд специфических требований, в том числе, к качеству сжатого воздуха, используемого для получения плазменной струи и, соответственно, к оборудованию воздухоподготовки, анализу которых и посвящена настоящая статья. Результат приведенного исследования показал необходимость применения осушителей адсорбционного типа в процессе подготовки воздуха для аппаратов плазменной резки.

#### Список литературы

1. Доброворский С.С. Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях // С.С. Доброворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мьялица // Сборник научных трудов "Вестник НТУ «ХПИ»": Технологии в машиностроении. Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – Вып.5542. – С. 25-31.
2. Быховский Д. Г. Плазменная резка. Л.: Машиностроение, 2001. С. 83.
3. Ширинов И. Г., Котиков В. Н. Плазменная резка. М.: Машиностроение, 1987. С. 198.
4. Мельгунов, М.С. Короткоцикловая безнагревная адсорбция / М.С. Мельгунов // Промышленный катализ в лекциях / под общ. ред. А.С. Носкова. – М.: 2009. – Вып. 8. – С. 62–105.

#### Bibliography (transliterated)

1. Dobrovorskij P.P., Basova E.V., Dobrovol'skaja L.G., Mjalica A.K. Povyshenie konkurentosposobnosti otechestvennogo mashinostroitel'nogo proizvo-dstva v sovremennyh usloviyah. Kharkov: NTU «KhPI», 2014. Print.
2. Plazmennaya rezka metalla [WWW resource]. URL: <http://плазмареz.pdf/?p=70> (Date of visit site: 28.09.2015).
3. Thermal Dynamics Operator's Ready Reference [WWW resource]. URL: [http://www.thermal-dynamic.com/literature/operators\\_reference/63-2823.pdf](http://www.thermal-dynamic.com/literature/operators_reference/63-2823.pdf) (Date of visit site: 28.09.2015).

Поступила (received) 12.10.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Аспекти застосування адсорбційних осушувачів для забезпечення стислим повітрям обладнання плазмового різання./ С.С. Доброворський, Б.О. Алексенко, Л.Г. Добровольська // Вісник НТУ «ХПІ».

Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 158–163. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X..

**Аспекты применения адсорбционных осушителей для обеспечения сжатым воздухом оборудования плазменной резки / С.С. Добротворский, Б.А. Алексенко, Л.Г. Добровольская // Вісник НТУ «ХПІ».** Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 158–163. – Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.

**Aspects of adsorption dryers for compressed air plasma cutting equipment / S.S. Dobrotvorsky, B.A. Alexsenko, L.G. Dobrovolska // Bulletin of NTU "KhPI".** Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.158–163. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X.

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Author*

**Добротвірської Сергій Семенович** - доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел. : (057) -720-66-25; e-mail: sdobro@mail.ru.

**Добротворский Сергей Семенович** – доктор технических наук, профессор Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: sdobro@mail.ru.

**Dobrotvorsky Sergey Semenovich** - Doctor of Technical Sciences, Professor of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: sdobro@mail.ru.

**Алексенко Борис Александрович** – аспірант НТУ «ХПІ», м. Харків, тел.: (057)-720-66-25 e-mail: commerage@list.ru;

**Алексенко Борис Александрович** – аспирант НТУ «ХПИ», г. Харьков, тел.: (057)-720-66-25 e-mail: commerage@list.ru;

**Alexsenko Borys Aleksandrovych** – graduate student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkov, tel.: (057)-720-66-25, e-mail: commerage@list.ru;

**Добровольська Людмила Георгіївна** - кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

**Добровольская Людмила Георгиевна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

**Dobrovol'skaya Lyudmila Georgiyevna** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: (057) -720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net.

## ЗМІСТ

<i>Памяти профессора Юрия Викторовича Тимофеева</i> .....	5
<i>Костюк Г. И., Бехзад Размджуи</i> Исследование возможности получения наноструктур на твердом сплаве ВК8 при действии импульсного лазерного излучения малой длительности.....	7
<i>Сизый Ю. А., Чайка Э. Г., Ушаков А. Н.</i> Моделирование фрикционных автоколебаний при малых перемещениях в станках.....	13
<i>Симсон Э. А., Хавин В. Л., Ягудин Д. С.</i> Разработка испытательного стенда для индивидуальных пружинных стоек сельскохозяйственных машин.....	19
<i>Добротворский С.С., Гнучих С.С., Добровольская Л.Г.</i> Моделирование процесса высокоскоростного соударения дисперсных композитов со сферическим телом.....	24
<i>Костюк Г. И., Григор О. Д.</i> О влиянии квантово-механического метода определения теплофизических и термомеханических характеристик на оценку размера зерна при действии ионов на титановый сплав.....	29
<i>Филатов Ю.Д., Ковалев В.А., Юрчишин О.Я.</i> Формообразование плоских оптических поверхностей при полировании.....	34
<i>Пермяков А.А., Яковенко И.Э.</i> К вопросу об унификации установочно зажимных приспособлений агрегатированного оборудования.....	38
<i>Костюк Г. И.</i> Выбор технологических параметров ионов для получения наноструктур требуемого размера зерна в твердом сплаве Т30К4.....	43
<i>Онисько О. Р.</i> Моделювання бічного профілю різальної кромки у залежності від геометричних параметрів різців призначених для виготовлення замкової нарізі.....	50
<i>Костюк Г. И.</i> Повышение эффективности режущих инструментов из быстрорежущей стали Р6М5К5 за счет обработки лучем лазера, работающего в фемтосекундном диапазоне.....	54
<i>Автономова Л. В., Грозенок Е. Д., Степук А. В.</i> Исследование распределения волокнистой структуры поковки подшипникового кольца при горячей штамповке.....	69
<i>Пермяков А.А., Приходько О.Ю., Слипченко С.Е.</i> Моделирование структур и систем управления циклом агрегатированных технологических систем на основе конечных автоматов.....	74
<i>Костюк Г. И., Брюяка О. О., Воляк Е. А.</i> Особенности образования наноструктур на одно-, двух- и трехкарбидных твердых сплавах при действии лазерного излучения.....	81
<i>Иванов В. О., Карпуть В. С., Дегтярьов І. М.</i> Конструкторсько-технологічний аналіз сучасних свердлильно-фрезерно-розточувальних верстатів.....	95
<i>Хавин Г.Л.</i> Изнашивание инструмента и критерии затупления при сверлении композитов.....	106
<i>Єнікєєв О.Ф., Євсюкова Ф.М., Приходько О.Ю.</i> Аналіз ефективності апаратних засобів програмного задавання швидкості обертання шліфувального круга.....	112
<i>Рузметов А. Р.</i> Визначення складові функції приналежності відносин в структурі підготовчої частини технологічних переходів.....	117
<i>Чибіряк Я. І., Коноплянченко Є. В., Нагорний В. В.</i> Ієрархічна система математичного моделювання визначення послідовності складання виробів.....	122
<i>Новиков Ф. В., Кленов О.С., Новиков Д. Ф.</i> Эффективное применение современных технологий механической обработки.....	127
<i>Новиков Ф. В., Полянский В. И.</i> Аналитическое определение температуры резания при лезвийной обработке.....	133
<i>Новиков Ф. В., Рябенков И. А.</i> Повышение эффективности операций зубошлифования зубчатых колес.....	138
<i>Клочко А. А., Гасанов М. И., Басова Е.В.</i> Технологический регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес.....	145
<i>Добротворский С.С., Алексенко Б.А., Добровольская Л.Г.</i> Аспекты применения адсорбционных осушителей для обеспечения сжатым воздухом оборудования плазменной резки.....	158

## CONTENTS

<i>Kostyuk G. Í., Bekhzad Razmdzhui</i> Study opportunities nanostructures on hard alloy WCCo8 under pulsed laser radiation of short duration.....	7
<i>Sisy J. A., Chayka E. G., Ushakov A. N.</i> Simulate of the friction self-excited oscillation with little travel inmashines.....	13
<i>Simson E. A., Khavin V. L., Yahudin D. S.</i> Development of test stand for individual spring tines for agricultural machinery.....	19
<i>Dobrotvorsky S.S., Gnuchih S.S., Dobrovolska L.G.</i> Simulation of the process of high-speed collision of disperse composites with a spherical body.....	24
<i>Kostyuk G. Í., Grigor O. D.</i> About the influence of quantum-mechanical method of determining the thermal and thermomechanical characteristics to evaluate the grain size in action at ions titanium alloys.....	29
<i>Filatov Y, Kovalev V., Yurchyshyn O.</i> Shaping planar optical surface during polishing.....	34
<i>Permyakov A. A, Yakovenko I.E.</i> About the question of the unification of clamping setting fixtures for aggregate equipment.....	38
<i>Kostyuk G. Í.</i> Study opportunities nanostructures on hard alloy WCCo8 under pulsed laser radiation of short duration.....	43
<i>Onysko O. R.</i> Modeling of the cutting edge side profile depending on the geometrical parameters of cutting tools for the manufacturing of tool-joint tapered thread. Inmashines.....	50
<i>Kostyuk G. Í.</i> Improving the efficiency of cutting tools HSS W6Mo5Co5 by treating ray lasers in the femtosecond range.....	54
<i>Avtonomova L. V, Grozenok ., I. D., Stepuk A. V.</i> Distribution of the fibrous structure in bearing rings during hot stamping.....	69
<i>Permyakov A.A., Prihodko O.Y., Slipchenko S.E.</i> Design of structures and control system by the cycle of thepaclaged technological systems on the basis of eventualautomats.....	74
<i>Kostyuk G. Í., Bruyaka O. O., Volyak Ye. A.</i> The peculiarities of nanostructures on one-, two- and trehkarbidnyh solid alloys under laser radiation.....	81
<i>Ivanov V. O., Karpus V. E., Dehtiarov I. M.</i> Design and manufacturing analysis of modern drilling-milling-boring machine tools.....	95
<i>Khavin G.L.</i> Tool wear and criteria of tool dulling when drilling composit.....	106
<i>Yenikieiev A., Yeviuikova F., Prihodko O.</i> Analysis of efficiency of vehicle facilities of programmatic task of speed of rotation of diamond-impregnated.....	112
<i>Ruzmetov A. R.</i> Determination components of membership functions in the preparatory part structure of the technological step.....	117
<i>Chibiryak Y. I., Konoplyanchenko E.V., Nagornyi V.V.</i> The hierarchical system of the mathematical modeling of the goods stowadge measurement.....	122
<i>Novikov F. V., Klenov O. S., Novikov D. F.</i> The effective use of modern machining technologies.....	127
<i>Novikov F. V., Polyanskiy., V. I.</i> Analytical determination of the cutting blade temperature during processing.....	133
<i>Novikov F. V., Ryabekov I. A.</i> Improved gear grinding gears.....	138
<i>Klochko A.A., Hasanov M. I., Basova E.V.</i> Production schedules the selection and appointment of the surface layer state parameters of hardened gears.....	145
<i>Dobrotvorsky S.S., Aleksenko B.A., Dobrovolska L.G.</i> Aspects of adsorption dryers for compressed air plasma cutting equipment.....	158

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХП»**

**Збірник наукових праць**

Серія:  
Технології в машинобудуванні

№ 33 (1205) 2016

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. Ю.В. Тимофієв,  
д-р техн. наук, проф. О.О. Клочко  
Технічний редактор канд. техн. наук, доц. Є.В. Басова

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І.Б. Обухова

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Багалія, 21, НТУ «ХП».  
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.  
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: vestms@lenta.ru.

Обл.-вид № 38-16.

Підп. до друку 26.12.2016 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік. -вид. арк. 10.  
Тираж 300 пр. Зам. No 3033. Ціна договірна.

---

Видавець і виготовлювач  
Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи  
ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, вил Багалія, 21

---

Надруковано в друкарні ФО-П Дуюнова Т.В.  
Свідоцтво про державну реєстрацію № 2475418720 від 19.11.2014 р.  
61023, Харків, вул. Веснина, 12.  
тел. +38 (057) 717-28-80, e-mail: promart\_order@ukr.net