

Висновки. Проведено аналіз умов експлуатації ланок механічної частини приводу преса револьверного типу, що відрізняються високим зносом в важких режимах роботи. Сучасними засобами САПР були визначені показники якості виробу і етапів технологічного процесу його отримання; обрано метод визначення показників якості, запропоновані засоби вимірювання, що забезпечують задану точність.

На підставі проведених випробувань отримані статистичні показники (математичне очікування, середньоквадратичне відхилення), побудований закон розподілу, що дозволив оцінити якість спроектованого виробу і розробити рекомендації відносно забезпечення показників якості матеріалу поверхневого шару вкладишів опор ковзання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Карасик И.И., Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения. – М.: Наука, 1978.
2. Коровчинский В.И., Теоретические основы работы подшипников скольжения. – М.: Машгиз, 1959.
3. Орлов, П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн./ Под ред. П.Н. Учаева. – Изд. 3-е, испр. – М.: Машиностроение, 1988.
4. Р. Бюснен Автомобильный справочник. Техн. ред. А.Я. Тихонов, Б.И. Медель // Ленинград 1959, 963 с.
5. Самсонов В.В. и др. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – Киев, «Наукова думка», 1976. – 269 с.
6. ГОСТ ИСО 12301-95 Подшипники скольжения. Методы контроля геометрических показателей и показателей качества материалов. – М: ИПК Издательство стандартов, 2000. – 57 с.

УДК: 372.862

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ В РАМКАХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

С.Д. Карпухин¹, С.А. Пахомова², М.В. Унчикова³

^{1,2,3}кандидат технических наук, доцент

e-mail: ¹dr.mgtu@yandex.ru, ²mgtu2013@yandex.ru, ³mgtu-gvi@yandex.ru

^{1,2,3}Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Россия

Аннотация. В работе проанализирована существующая методика исследования структуры и свойств высокопрочных никелевых сплавов. Показана важность развития новых методик обучения студентов технических вузов. Рассмотрены требования к лабораторно-практическим работам и оценки их выполнения и защиты. Представлены рекомендации для выполнения практического занятия бакалавра по направлению 22.04.01

«Материаловедение и технологии материалов». Обоснована важность раскрытия творческого потенциала студента в процессе его самостоятельной работы на занятии. Творческий подход заключается в том, что работа выполняется на основе системного анализа поставленной темы исследования с учетом технологических, экономических и экологических факторов.

Ключевые слова: методика лабораторно-практического занятия, самостоятельная работа студентов, исследования, сплавы, строение, эксплуатационные свойства, ролевая игра.

RESEARCH OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH -STRENGTH ALLOYS IN THE EDUCATIONAL PROCESS

S. Karpukhin¹, S. Pakhomova², M. Unchikova³

^{1,2,3}Ph.D., assistant Professor

e-mail: ¹dr.mgtu@yandex.ru, ²mgtu2013@yandex.ru, ³mgtu-gvi@yandex.ru

^{1,2,3} Bauman Moscow State Technical University, Russia

Abstract. The paper analyzes the existing methodology for studying the structure and properties of high -strength Nickel alloys. The importance of developing new teaching methods for students of technical universities is shown. Recommendations for the implementation of the bachelor's practical training in the direction of 22.04.01 "Materials Science and Materials Technology" are presented. The importance of revealing the creative potential of the student in the process of his independent work in the classroom is justified. The creative approach consists in the fact that the work is performed on the basis of a systematic analysis of the set research topic, taking into account technological, economic and environmental factors.

Keywords: *methods of laboratory-practical lesson, independent work of students, research, alloys, structure, performance properties, role-playing game.*

Введение. В соответствии с федеральными государственными стандартами высшего профессионального образования для совершенствования подготовки студентов основные методические инновации в современном вузе должны быть связаны с использованием активных и интерактивных форм обучения, основанных на принципах взаимодействия, диалога, совместной работы по определенной проблеме [1]. Использование новых подходов является эффективным способом углубленного изучения наиболее важных и сложных разделов дисциплины [2, 3]. Понимание комплексных механизмов упрочнения современных сплавов, принципов легирования для обеспечения высокой термостабильности структурно-фазового состояния материалов требует актуализации знаний студентов о взаимосвязи структуры и свойств, а также закономерностях изменения структуры в результате технологических операций.

В связи с этим для детального анализа принципов разработки сплавов,

удовлетворяющих требованиям современной техники [4-7], необходимо монологическое изложение учебного материала на лекциях дополнить лабораторно-практическим занятием, которое включает обсуждение, исследование особенностей структуры сплавов, изучение современных высокотехнологичных наукоемких процессов, используемых при получении изделий. Лабораторно-практическое занятие частично совмещает семинарское и лабораторное занятия [8-10], сочетает изучение вопросов теории с приобретением практических навыков и анализом полученных результатов, что способствует более глубокому усвоению материала студентами.

Цель работы – совершенствовать методы исследования свойств материалов на примере высокопрочных никелевых сплавов в виду отсутствия краткого системного изложения материала в учебной литературе, а основными источниками информации являются монографии, материалы периодической печати и ресурсы информационной сети Интернет.

Основной материал. Лабораторно-практическое занятие

Лабораторно-практическое 4-часовое занятие разбито на 4 части: изучение особенностей строения жаропрочных материалов (часть 1); состава, структуры, типичной термической обработки, свойств и области применения деформируемых (часть 2) и литейных никелевых суперсплавов (часть 3), интерметаллидных сплавов на основе Ni_3Al (часть 4). Для повышения активности студентов при выполнении некоторых пунктов задания используются ролевые игры, т.е. преподаватель «назначает» студентов на должности инженеров-металловедов, инженеров-технологов, инженеров-термистов и т.д. При выполнении учебно-исследовательской работы студенты получают результаты, анализируют их и делают заключение в рамках предложенной должности.

В первой части занятия студенты, как инженеры-материаловеды, анализируют условия работы высокотемпературных деталей, механизм пластической деформации в зависимости от температуры, формулируют требования к составу и структуре для обеспечения стабильного состояния жаропрочных материалов [11].

Для закрепления знаний о взаимосвязи механизмов пластической деформации и способов упрочнения сплавов студенты «конструируют» жаропрочный материал, заполняя таблицу: механизмы высокотемпературной пластической деформации - способы повышения жаропрочности - требования к химическому и фазовому составу жаропрочных материалов [12].

Во второй части студенты изучают способы реализации базовых принципов разработки жаропрочных материалов на примере никелевых сплавов. Они анализируют химический и фазовый состав деформируемых

никелевых сплавов, исследуют влияние термической обработки на структуру и свойства дискового сплава ЭК151.

Для лучшего усвоения материала студенты сравнивают деформируемые никелевые сплавы по системам легирования, содержанию γ - и γ' -образующих элементов, фазовому составу, количеству γ' -фазы, жаропрочности.

Количество γ' -фазы V' в сплавах в зависимости от содержания γ' -образующих элементов рассчитывают по формуле:

$$V' = 4,6222 [(Ti + Al + Nb + Ta + Hf) - 2], \quad (1)$$

где V' измеряется в % об., Ti, Al, Nb, Ta, Hf - содержание элементов в сплаве, ат. %.

Результаты сравнения представляют в виде диаграмм, выполняя ранжирование сплавов по пределу длительной прочности делают вывод о влиянии химического и фазового состава на жаропрочность сплавов.

Особенности термической упрочняющей обработки с учетом ее влияния на многообразие служебных характеристик современных деформируемых дисковых сплавов студенты изучают на примере сплава ЭК151. На основе этого сплава был разработан сплав ВЖ175, который по эксплуатационным показателям в настоящее время превосходит зарубежные аналоги [6].

Перед студентами, исполняющими в данном случае обязанности инженеров-термистов, ставится задача по определению оптимальных режимов термической обработки в зависимости от температуры эксплуатации сплава.

Студенты по фотографиям и схемам распределения напряжений и температур по сечению детали анализируют конструктивные особенности (рис. 1) и условия эксплуатации дисков турбины, и соответственно, требования к материалам. Достижение необходимого комплекса свойств дисковых сплавов ГТД по пределам прочности, текучести, ползучести, сопротивлению малоциклового усталости является трудно реализуемой на практике задачей, т.к. требует использования различных по природе механизмов упрочнения - для повышения жаропрочности сплавы должны иметь крупнозернистую структуру, в то время как сопротивление усталости увеличивается при измельчении зерна. Согласно стандарту ASTM для температур эксплуатации до 750°C наиболее приемлема микроструктура с размером зерна от 10 до 30 мкм, для более высоких температур - 45...120 мкм. Формирование необходимого размера зерна может быть достигнуто за счет оптимизации режимов термической обработки, которая для дисперсионно-твердеющих сплавов включает закалку и старение и позволяет в широком диапазоне изменять балл зерна и размер γ' -фазы в зависимости от соотношения температур закалки и полного растворения γ' -фазы $T_{пр.\gamma'}$, т.к. рост зерна определяется присутствием γ' -фазы, тормозящей движение границ [3].

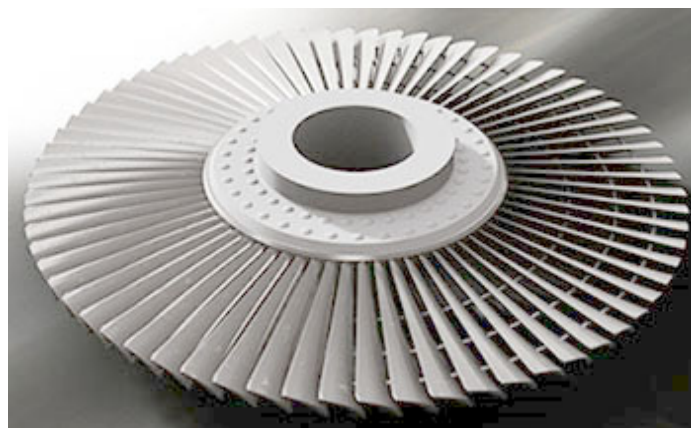


Рис. 1. – Диск турбины

Студенты исследуют микроструктуру сплава ЭК151 после различных режимов закалки (рис. 2) на компактном инвертируемом микроскопе GX-41, определяют балл зерна методом сравнения с эталонами шкал согласно ГОСТ 5639-82, рисуют схему упрочняющей термической обработки, указывают назначение и получаемые структуры после каждой операции, строят картограмму свойств в зависимости от температуры закалки сплава. Такой комплексный подход к исследованию структуры и свойств термически обработанного сплава позволяет сделать вывод о рекомендуемом режиме закалки в зависимости от рабочей температуры.

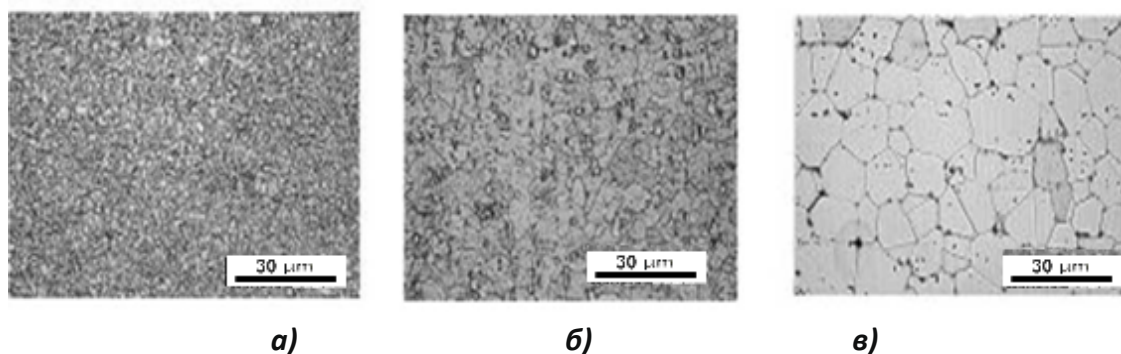


Рис. 2. – Микроструктура сплава ЭК151 после закалки и двойного старения:
а) $T_{\text{зак}} < T_{\text{пр}'}; б) T_{\text{зак}} \sim T_{\text{пр}'}; в) T_{\text{зак}} > T_{\text{пр}'}$

Третья часть занятия посвящена исследованию литейных никелевых сплавов, предназначенных в первую очередь для изготовления рабочих лопаток ГТД, которые относятся к наиболее нагруженным деталям, работающим в условиях одновременного воздействия высоких температур, циклических напряжений, коррозионно-окислительной среды. Изготовление лопаток ГТД методом точного литья по выплавляемым моделям имело решающее значение, поскольку позволило не только решить проблему повышения жаропрочности и коэффициента использования дорогостоящих ма-

териалов, но и разработать лопатки с высокоэффективной системой охлаждения, тем самым существенно повысить температуру газа перед турбиной, и как следствие тягу двигателя.

В этой части занятия перед студентами ставится технологическая задача по выбору способа получения отливки для формирования оптимальной структуры в целях достижения максимальной жаропрочности неохлаждаемых рабочих лопаток и максимальной термостойкости охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей.

Для решения этой задачи студенты проводят сравнительный анализ литейных сплавов с равноосной, направленной и монокристаллической структурами (рис. 3), изучают особенности химического состава сплавов, схемы технологических процессов и условия кристаллизации при получении деталей с поликристаллической и ориентированными структурами, выясняют причину положительного влияния направленной кристаллизации (НК) на жаропрочность.

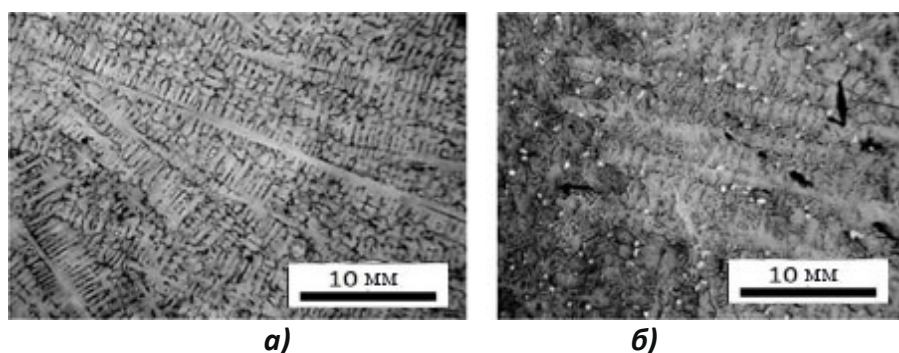


Рис. 3. – Микроструктура сплава ЖС6У после равноосной (а) и направленной (б) кристаллизации, х50

Развитием технологии НК является разработка технологии монокристаллического литья [13]. Студенты изучают условия получения монокристаллической структуры с применением затравки и конкурентного роста, исследуют макро- и микроструктуру литейного сплава ВЖМ 4, рассчитывают по формуле (2) уровень термических напряжений $\sigma_{\text{терм}}$ в зависимости от кристаллографической ориентации (КГО).

$$\sigma_{\text{терм}} = E \alpha \Delta t / (1 - \mu), \quad (2)$$

где E - модуль упругости сплава, μ - коэффициент Пуассона, α - коэффициент линейного расширения; Δt - температурный интервал.

Анализ анизотропии свойств и термических напряжений позволяет сделать вывод о преимуществах формирования в охлаждаемых лопатках ГТД монокристаллической структуры с КГО $\langle 001 \rangle$, т.к. низкие значения модуля упругости в этом направлении способствуют возникновению меньших термических напряжений. Неохлаждаемые рабочие лопатки, для которых

требование термостойкости не является определяющим, должны иметь монокристаллическую структуру с КГО, отвечающей максимальным значениям модуля упругости $\langle 111 \rangle$ и, следовательно, жаропрочности [14].

Четвертая часть занятия посвящена интерметаллидным сплавам ВКНА на основе соединения Ni_3Al , которые относятся к перспективным жаропрочным материалам нового поколения с рабочей температурой до $1250^\circ C$ и применяются для лопаток газовых турбин, элементов камер сгорания, створок регулируемого сопла и других высокотемпературных тонкостенных литых деталей [11].

Студенты проводят сравнительный анализ интерметаллидных и литейных суперсплавов по фазовому составу с помощью диаграммы состояния Ni-Al (рис. 4), рабочим температурам, плотности, удельной длительной прочности, объясняют причины повышенной термостабильности сплавов ВКНА. Задание также предполагает проведение исследований макро- и микроструктуры (рис. 5) сплава ВКНА-1В в зависимости от КГО, изучение особенностей термической обработки [12, 13].

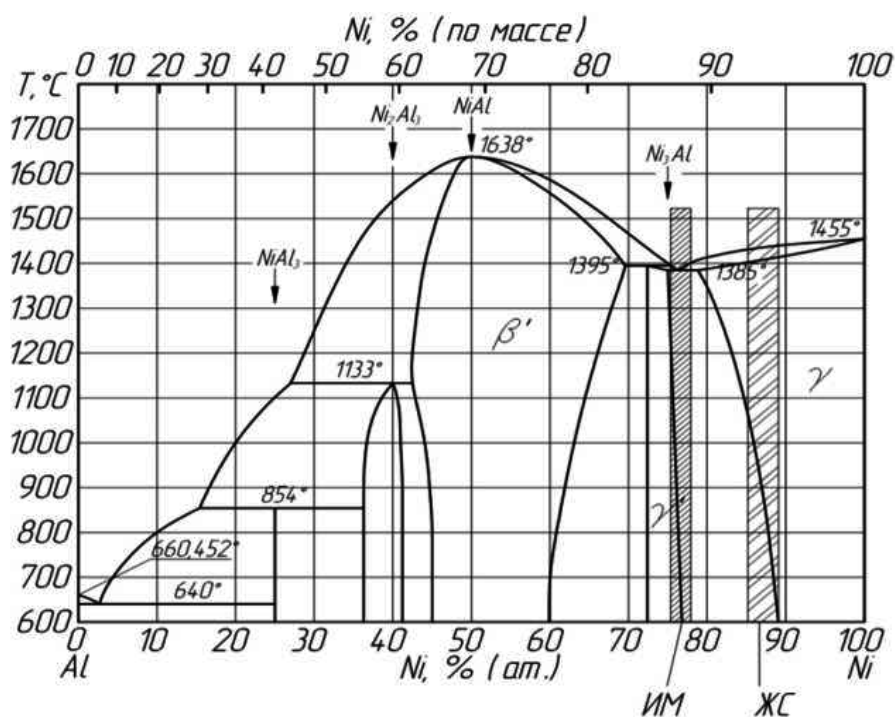


Рис. 4. – Диаграмма состояния Ni-Al

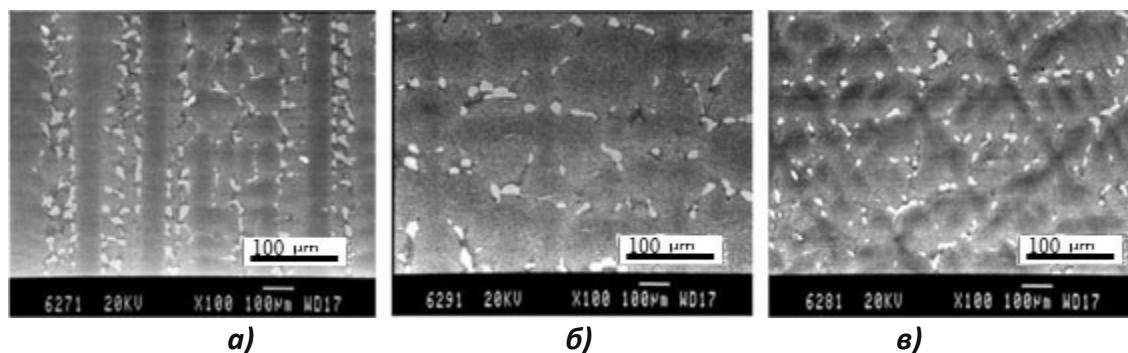


Рис. 5. – Микроструктура монокристаллического сплава ВКНА-1В в зависимости от КГО: а) $\langle 001 \rangle$, б) $\langle 011 \rangle$, в) $\langle 111 \rangle$

Вывод. Лабораторно-практическое занятие формирует целостное представление о строении и свойствах современных жаропрочных никелевых сплавов, способах разработки и перспективах развития сплавов за счет изменения системы легирования и совершенствования технологических процессов; закрепляет знания о влиянии структурно-фазового состояния на свойства сплавов, способствует приобретению навыков в комплексном исследовании строения материалов с помощью диаграмм состояния, макро- и микроанализа, развивает ключевые профессиональные компетенции, связанные с системным подходом выбора материалов в зависимости от условий эксплуатации изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гущин Ю.В. Интерактивные методы обучения в высшей школе // Психологический журнал Международного университета природы, общества и человека «Дубна». 2012. №2. С.1-18.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: Сб. информационных материалов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ВИАМ. 2015. 719 с. С.355-383.
3. Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Физико-химические и структурные характеристики жаропрочных никелевых сплавов // Металлы. 2001. №2. С.63-73.
4. Унчикова М.В., Базылева О.А., Буякина А.А. Методика проведения нового лабораторно-практического занятия "Исследование структуры и свойств никелевых жаропрочных сплавов" с применением интерактивной формы обучения // Инженерный вестник. 2017. № 4. С. 19-27.
5. Пахомова С.А., Унчикова М.В. Перспективные методы обучения бакалавров дисциплине "Инженерия поверхности" // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. 2016. № 3. С. 475-482.
6. Федорова Л.В., Федоров С.К., Иванова Ю.С., Сидоренко В.В. Отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка стали 8620 // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 8 (140). С. 39-42.
7. Пахомова С.А., Поваляев А.И., Шебешев К.И. Керамические композиционные материалы на основе нитрида кремния для коррозионностойких подшипников качения

// В сборнике: Ключевые тренды в композитах: наука и технологии. Материалы Международной научно-практической конференции. 2019. С. 556-561.

8. Ryzhov, N.M., Pakhomova, S.A. Effectiveness of thermal shot blasting for case-hardened steels // Metal Science and Heat Treatment. 1994. Т. 36. No. 5. Pp. 253.

9. Pakhomova S.A. and Povalyayev A.I. Silicon nitride-based ceramic composite materials for corrosion-resistant rolling bearings // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 683, 012040. DOI:10.1088/1757-899X/683/1/012040

10. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение. 1998. 463 с.

11. Петрушин Н.В., Каблов Е.Н., Светлов И.Л. Компьютерное конструирование жаропрочного никелевого сплава IV поколения для монокристаллических лопаток газовых турбин / В сб. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. К 100-летию со дня рождения академика С.Т. Кишкина. М. 2006. С.98-115.

12. Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Карпунин С.Д. Повышение износостойкости стальных деталей электромеханической обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 7 (151). С. 305-308.

13. Морозов А.В., Федорова Л.В., Горев Н.Н., Шамуков Н.И. Исследование влияния режимов сегментной электромеханической закалки на формирование участков регулярной микротвердости // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 2. С. 24-27.

14. Materials science at DMOZ. Режим доступа: <https://www.dmoz.org/Science/Technology/Materials> (дата обращения 01.10.2019).

УДК 621.9.025.1 : 621.833.1

ЗАСТОСУВАННЯ ЗБІРНИХ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ ІЗ ТВЕРДОСПЛАВНИМИ ЗУБЦЯМИ ЗМЕНШЕНОГО КУТА ПРОФІЛЮ ДЛЯ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВЕЛИКИХ МОДУЛІВ

Я.М. Литвиняк¹, І.І. Юрчишин²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, e-mail: ltvnkya@i.ua

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна, e-mail: yur@center-sapr.com

Анотація. Запропоновано обґрунтоване удосконалення процесу нарізання евольвентних циліндричних зубчастих коліс великих модулів розробленими збірними черв'ячними фрезами з твердосплавними зубцями із зменшеним кутом профілю.

Ключові слова: зубчасте циліндричне колесо, збірна черв'ячна фреза, зубці з твердого сплаву.