

УДК 621.9.015

¹Клочко А.А., ²Мироненко Е.В., ¹Анцыферова О.А.,²Макастрова Л.А., ³Киреев В.Е.¹НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина²ДГМА, г. Краматорск, Украина³КНУ Украины "КПИ", г. Киев, Украина

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТЯЖЕЛЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Введение

Одним из главных направлений развития станкостроения является повышение качества и точностных параметров металлообрабатывающего оборудования. Это направление определяет степень концентрации и специализацию производства. Оценкой уровня развития производства является уровень технологии изготовления высокоточных, тяжело нагруженных, закаленных зубчатых колес, которые во многом определяют надежность работы металлорежущих станков.

Основная часть

Количество изготавливаемых зубчатых колес непрерывно растет вместе с развитием станкостроения. К изготовлению зубчатых колес существует комплексный подход. Кроме высокой прочности, долговечности и точности высокие требования предъявляются к свойствам и характеристикам поверхностного слоя зубьев зубчатых колес, формирующимся на окончательных этапах их изготовления. Расширяются технологические возможности зубошлифовальных станков, совершенствуются методы финишной обработки зубчатых колес (рис. 1), с тем, чтобы в результате обработки получить соответственно сформированное состояние поверхностного слоя зубчатых колес в зависимости от эксплуатационных нагрузок. Поэтому значительно повышается интерес к окончательной обработке зубчатых колес, в том числе, особенно к шлифованию зубьев.

Проблемой в формировании поверхностного слоя зубьев зубчатых колес во время реализации технологического процесса является недостаточность исследований, характеризующих изменение этого состояния в различных процессах обработки, особенно на окончательных этапах формирования эвольвентной поверхности зубьев с помощью различных схем зубошлифования для достижения заданной конструктором качества поверхностного слоя и точности в соответствии с требованиями ГОСТ1643-81 для соответствующей степени точности зубьев зубчатого колеса.

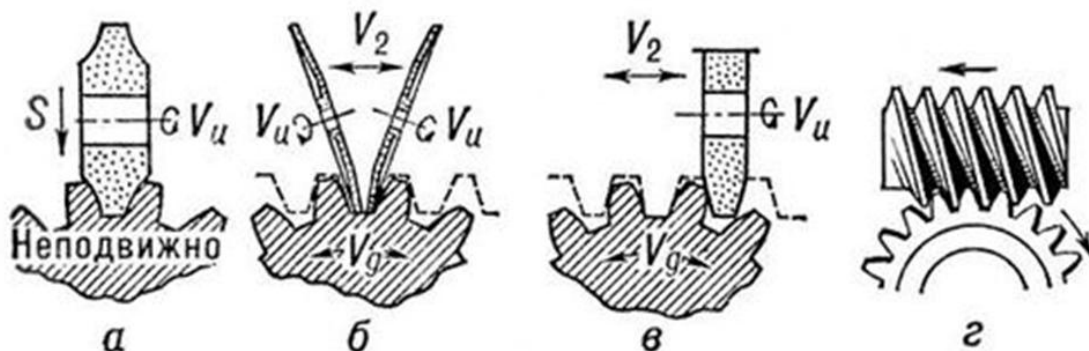


Рисунок 1 – Схемы зубошлифования:

- а – профильное зубошлифование; б – схема обката двумя тарельчатыми кругами;
в – схема двухпрофильного зубошлифования; г – зубошлифование винтовым кругом

Процесс зубошлифования зависит от многих факторов, оказывающих влияние на формирование свойств и характеристик поверхностного слоя зубчатых закаленных колес. Зубошлифование осуществляется таким образом, чтобы не произошел, прежде всего, отпуск шлифованных поверхностей, отсутствовали прижоги, сохранялась высокая микротвердость поверхностного слоя.

Изменение состояния поверхностного слоя в процессе любого технологического воздействия зависит не только от условий осуществления самого процесса, но и от конструктивных особенностей зубчатого колеса, которые совместно с последующей обработкой определяют формирование состояния поверхностного слоя готовой детали. Процесс формирования требуемого, по условиям эксплуатации, состояния поверхностного слоя зуба зубчатого колеса необходимо рассматривать как комплексное воздействие конструктивных и технологических факторов, определяющих, в конечном счете, долговечность и надежность работы шпиндельной бабки, ламельных суппортов тяжелых токарных станков с ЧПУ.

Проблема технологического обеспечения требуемого качества поверхностного слоя зависит от выбранной схемы формообразования, характеристики и формы шлифовального круга, режимов резания, применяемой СОЖ, способом и частотой правки шлифовального круга (рис. 2).

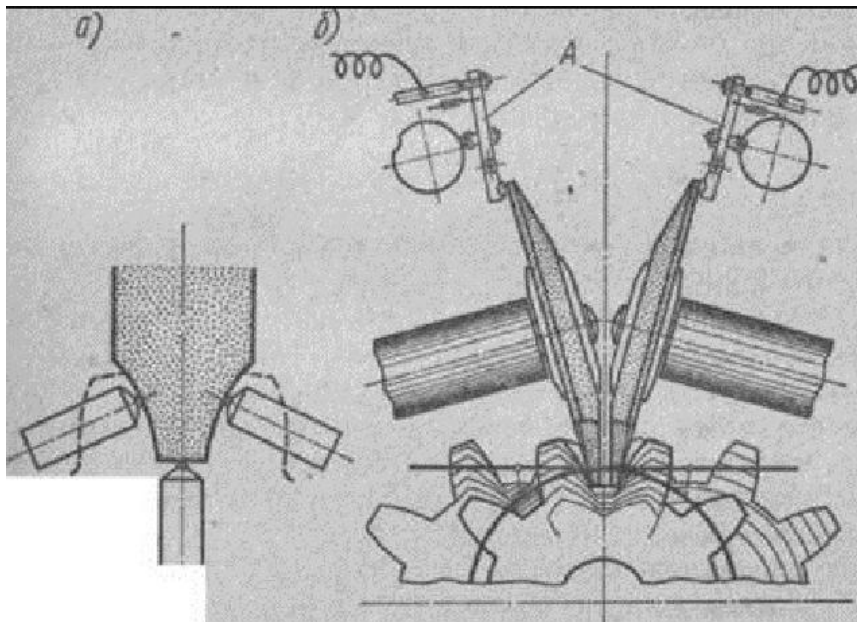


Рисунок 2 – Схемы правки круга при зубошлифовании:
а – при профильном зубошлифовании; б – при зубошлифовании двумя тарельчатыми кругами

Введение в действие ГОСТ 2789 – 73 не решило проблему технологического обеспечения и улучшения эксплуатационных свойств зубчатых колес, так как их несущая способность и контактное взаимодействие зависят от состояния поверхностного слоя в целом (макроотклонения, волнистости, шероховатости, физико-химических свойств), а не только от параметров шероховатости, т.е. требуется комплексный подход к изучению состояния поверхностного слоя. Выбор системы параметров поверхностного слоя зубчатых колес одновременно предопределяется возможностью их технологического и метрологического обеспечения. Необходимость комплексного подхода к выбору, назначению и технологическому обеспечению системы параметров поверхностного слоя зубчатых колес подтверждают результаты исследований целого ряда исследователей [1, 2, 3]. Эти исследования выявили следующие основные задачи, стоящие перед специалистами в области технологии машиностроения изготовления зубчатых колес (табл. 1).

Таблица 1

Основные задачи, стоящие перед специалистами в области технологии машиностроения изготовления зубчатых колес

1	Определение характеристики поверхностного слоя
2	Установить взаимосвязь состояния поверхностного слоя зубчатых закаленных колес (макроотклонения, волнистости, шероховатости, физико-механических свойств).
3	Обеспечить фундаментальное развитие научных методов определения необходимых параметров состояния рабочих поверхностей зубчатых закаленных колес с целью обеспечения качественных показателей состояния поверхностного слоя.
4	Развивать научное прогнозирование получаемого состояния поверхностного слоя зубчатых закаленных колес при различных условиях их обработки
5	Создать технологическую базу данных по оптимизации технологии производства зубчатых закаленных колес с учетом обеспечения требуемой системы параметров их поверхностных слоев

Изменения состояния поверхностного слоя будут происходить постоянно. Особенно это касается изменения физико-химических и механических свойств - поверхностной твердости, структуры и остаточных напряжений, которые в наибольшей степени являются важными по своему влиянию на прочность [2, 4].

Стратегия процесса формирования поверхностного слоя состоит из фаз, представленных на рис. 3.

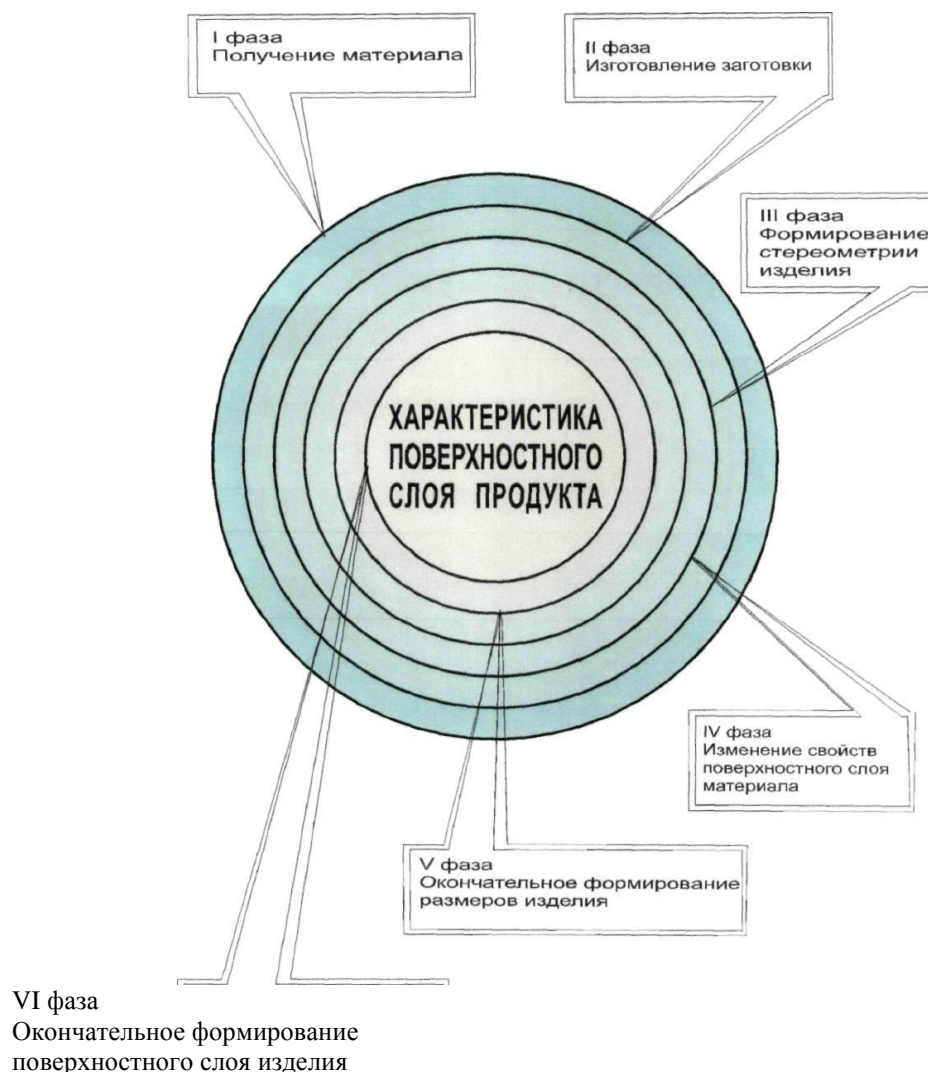


Рисунок 3 – Фазы формирования поверхностного слоя зубчатого колеса

В настоящее время рассматривается два научных направления технологического обеспечения эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес. Первое из них предусматривает технологическое обеспечение системы параметров поверхностного слоя. Второе - технологическое обеспечение непосредственно эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес [1, 4, 5, 6].

При наличии постоянного контакта зацепляемых зубьев, входящих в зацепление значительное влияние на эксплуатационные свойства зубчатых колес оказывает зона контактного взаимодействия. Здесь и далее, под зоной контактного взаимодействия принимается объем, который образован между границами, очерченными линиями, отсекающими слой металла с поверхностными остаточными напряжениями взаимодействующих плоскостей.

Теоретический анализ несущей способности поверхностного слоя зубчатых колес позволяет установить необходимую систему параметров его состояния (рис. 4), включающую в себя макроотклонения (H_{\max} – максимальная высота макроотклонения, H_p – высота сглаживания макроотклонения, характеризующая металлоемкость поверхности), волнистость (W_a – среднеарифметическое отклонение профиля волнистости, W_p – высота сглаживания профиля волнистости; W_z – высота волнистости по десяти точкам; S_{mw} – средний шаг волнистости, t_{mw} – относительная опорная площадь волнистости на уровне средней линии), шероховатость ГОСТ 2789-73 [2] (Рис. 1.11): R_a – среднее арифметическое отклонение профиля, R_p – расстояние от линии выступов до средней линии, R_{\max} – наибольшая высота неровностей профиля, R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам, t_m – относительная опорная площадь неровностей на уровне средней линии, S_m – средний шаг неровностей, S – средний шаг неровностей по вершинам локальных выступов, t_p – относительная опорная длина профиля на уровне p и физико-механические свойства ($H_{\mu 0}$ – поверхностная микротвердость, σ_0 – величина остаточных напряжений на поверхности, h_{μ} – глубина залегания упрочненного слоя, $h_{\sigma 0}$ – глубина залегания остаточных напряжений поверхности).

Анализ работ по проблеме технологического обеспечения эксплуатационных свойств цилиндрических зубчатых колес показывает, что научно-обоснованный выбор, назначение и технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес является сложной и многовариантной задачей. Учитывая это обстоятельство для решения подобных задач необходимо использование специально математического аппарата с применением методов многокритериальной оптимизации и средств.

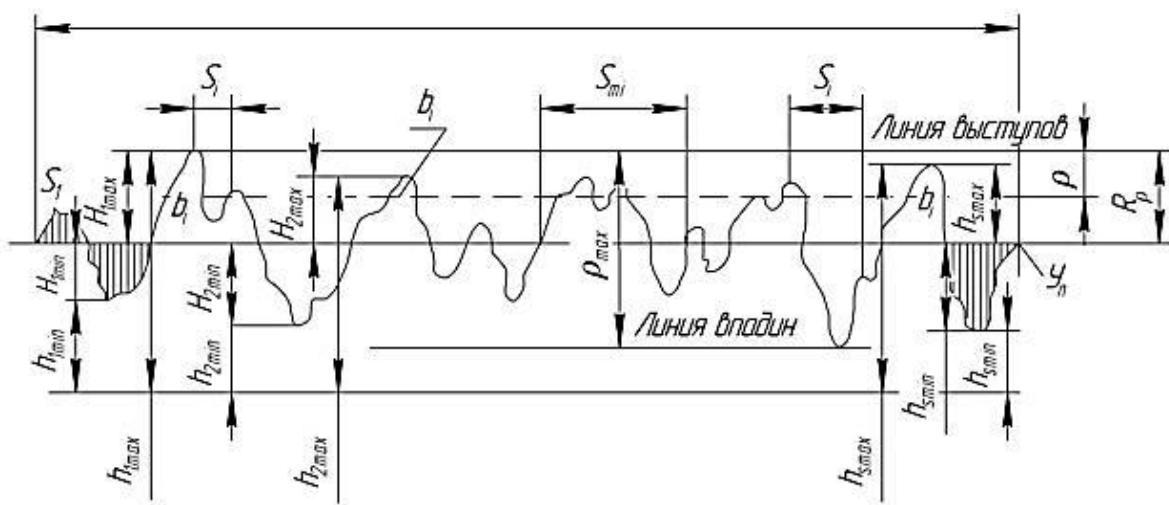


Рисунок 4– Профиль шероховатости поверхности

Исходя из современных представлений, зона контактного взаимодействия состоит из двух основных частей – объема межконтактного пространства и объема металла, имеющего остаточные напряжения сопрягаемых поверхностей зубчатых колес [16].

Объем межконтактного пространства зависит от формы поверхности и ее геометрических характеристик, оценка определяется тремя основными подходами.

Первый – использует спектральную теорию неровностей [2]. Он основан на оценке несущей способности поверхности без деления ее неровностей на шероховатость и волнистость. Этот подход, имея положительные стороны, не учитывает традиций, на базе которых разработаны стандарты во всех странах мира. Это сужает технологические возможности обеспечения геометрических параметров поверхности зубчатых колес.

Второй – непараметрический подход к оценке состояния поверхностного слоя основан на сравнительной оценке поверхности относительно шаблона. Такой подход применяется, преимущественно, для решения частных задач наиболее изученных соединений. Применение шаблонов затрудняет процессы регламентации поверхности с позиции ее эксплуатационных свойств.

Третий – параметрический подход, основанный на исторически сложившихся условиях разделения неровностей на шероховатость, волнистость, микрорельеф и макроотклонения. Этот подход создает возможности наиболее доступной регламентации поверхностей, дифференцированно учитывает все неровности и не имеет недостатков, присущих первому и второму случаю. Результатом исследований в этом направлении явилось ГОСТ 2789-73, ГОСТ 24773-81, ГОСТ 2.308-79. В то же время для закаленных зубчатых колес не регламентируются параметры волнистости, не отражен характер макроотклонений, нет рекомендаций по регламентации эксплуатационных свойств эвольвентных поверхностей контактируемых зубчатых передач [1, 2, 3].

В отличие от объема межконтактного пространства в настоящее время отсутствует методика по определению слоя металла, имеющего измененное физико-механическое состояние. Физико-механические параметры не регламентируются. Определяют лишь такие характеристики как степень наклепа, глубину залегания наклепанного слоя.

Анализ моделей по расчету характеристик контакта поверхностей основан на представлении выступов реальной элементарной поверхности (Рис. 5) в виде сферы, конусов, цилиндров, столбиков прямоугольной формы, эллипсоидов, эллиптических параболоидов.

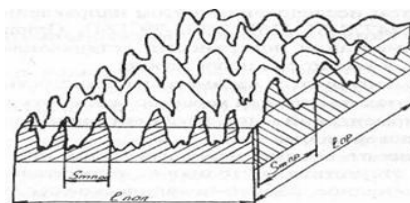


Рисунок 5 – Элементарная поверхность

Выступы имеют сферическую форму. При этом, имеет место линейная зависимость роста числа выступов при увеличении глубины рассматриваемого уровня.

Предлагается учитывать при прогнозировании закономерностей формирования параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес [3, 5, 7], структурно-энергетическое состояние материала (величину накопленной внутренней и упругой энергии, коэффициент напряжения межатомных связей, величину истинного предела текучести).

Результаты работ показывают, что на контактное взаимодействие оказывает влияние: эксплуатационные свойства зубчатых колес, характер изменений геометрических параметров и физико-механических свойств, исходные параметры качества поверхностного слоя контактирующих поверхностей. Все составляющие формируются в ходе технологического процесса изготовления деталей, финишными процессами которого, как правило, являются

методы механической обработки. Их выбор в процессе решения задач технологического обеспечения наиболее эффективно осуществлять на базе параметрического подхода к оценке состояния поверхности.

При изучении процесса формирования поверхностного слоя при различных методах механической обработки зубчатых колес установлено, что при одних и тех же параметрах, которые обеспечивались в ходе обработки различными методами в узлах тяжелых редукторов, зубчатые колеса имели разные эксплуатационные характеристики. Это обусловило интерес к изучению влияния качества поверхности непосредственно на эксплуатационные свойства контактирующих поверхностей, имеющих практическое применение в машиностроении.

Основными причинами выхода зубчатых передач из строя являются: поломка зубьев, выкрашивание активных поверхностей и отслаивание поверхностных слоев зубьев, абразивный износ зубьев, пластические деформации зубьев и заедание [5, 7].

В следствии внезапности отказа, поломка зубьев является весьма опасным видом разрушения. В подавляющем большинстве случаев она носит усталостный характер, поскольку каждый зуб входит в зацепление периодически, кроме этого в процессе зацепления меняется плечо приложения силы, т. е. изменяется величина изгибающего момента. Напряжения при изгибе, превышающие предел выносливости, вызывают появление микротрещин, которые возникают в зоне максимальной концентрации напряжений, обычно в месте перехода зубьев в обод колеса. Появившиеся микротрещины при дальнейшей работе передачи распространяются в глубь зуба по нормали к переходной кривой. Поломка зубьев наиболее часто встречается у зубчатых колес с высокой твердостью активных поверхностей зубьев ($H > HB 350$) и определяется качеством состояния поверхностного слоя.

Причинами поломок зубьев могут оказаться возникшие в процессе эксплуатации перегрузки отдельных участков зубьев вследствие неравномерности распределения нагрузки по ширине зубчатого венца из-за перекоса осей зубчатых колес, вызванного увеличением люфтов в подшипниках и шлицевых соединениях, деформации осей и самих колес, а также различного рода производственных дефектов (раковин при отливке, трещин при термообработке, повышенной волнистостью и шероховатостью в сочетании с физико-механическими свойствами поверхностного слоя.).

При изломе зубьев косозубых колес трещина появляется в торцевой поверхности колеса у основания зуба и распространяется по длине зуба наклонно к его вершине в следствии несоответствия качественных показателей поверхностного слоя.

Одной из причин несоответствия качественных показателей формирования поверхностного слоя в процессе зубошлифования являются схема съема металла абразивным кругом, степень засаливания круга, характеристика абразивного круга, степень очистки СОЖ.

Выводы

Таким образом, с целью обеспечения стабильности качественных показателей поверхностного слоя необходимо:

1. Учитывать при прогнозировании закономерностей формирования параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес структурно-энергетическое состояние материала: величину накопленной внутренней и упругой энергии, коэффициент напряжения межатомных связей, величину истинного предела текучести;

2. Контактное взаимодействие оказывает влияние: эксплуатационные свойства зубчатых колес, характер изменений геометрических параметров и физико-механических свойств, исходные параметры качества поверхностного слоя контактирующих поверхностей.

3. Все составляющие параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес формируются в ходе технологического процесса изготовления, финишными процессами которого, как правило, являются схемы зубошлифования, характеристика абразивного круга, схема съема металла. Их выбор в процессе решения задач

технологического обеспечения наиболее эффективно осуществлять на базе параметрического подхода к оценке состояния поверхности;

4. При изучении процесса формирования поверхностного слоя при различных методах механической обработки зубчатых колес установлено, что при одних и тех же параметрах, которые обеспечивались в ходе обработки различными методами в узлах тяжелых редукторов, зубчатые колеса имели разные эксплуатационные характеристики.

Перечень источников литературы: 1. Кане М.М. Управление качеством продукции машиностроения / М.М. Кане, А.Г. Суслов, О.А. Горленко и др. под общ. ред. д.т.н. М.М. Кане. – М. : Машиностроение, 2010. – 416 с. 2. Брусиловский Б.А. Физико-механические характеристики поверхностных слоев в зависимости от особенностей технологических приемов обработки зубчатых изделий / Б.А. Брусиловский, А.А. Клочко, М.М. Кане // Передовой производственный опыт и научно-технические достижения : информ. сборник. – М. : ВНИИТЭМР. – 1990. – Вып. 6. – С. 20–21. 3. Вибір і призначення систем параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості / Е.В. Мироненко, О.М. Шелковой, О.О. Клочко, О.М. Кравцов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». : зб. наук. пр. : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів. – 2013. – №772. – С. 207–213. 4. Специальные технологи зубообработки крупномодульных закаленных колес : монография / Ю.В. Тимофеев, В.Ф. Шаповалов, А.А. Клочко [и др.]. – Краматорск: ДГМА, 2011. – 128 с. ISBN 978-966-379-524-9 5. Тимофеев Ю.В. Научные предпосылки определения условий формирования величин упроченного слоя при формообразовании крупномодульных зубчатых колес / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, А.А. Клочко // Вісник Національного технічного університету КПІ: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Проблеми механічного приводу. – Київ : НТУ КПІ, 2012. – № 64. – С. 288–293. 6. Шелковой А.Н. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А.А. Клочко // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серия «Машиноприладобудування та транспорт». –Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210. 7. Методология разработки модели управления точностью, качеством и производительностью формообразования при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, Е.В. Мироненко, А.А. Клочко // Сборник научных трудов “Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении: сборник научных трудов [Текст] / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное общество «ОНИКС». – Краматорск: ДГМА, Ирбит: ЗАО «ОНИКС», Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). 2014. – С. 96–117. ISBN 978-5-906703-03-3.

Рецензент: **Клименко Г.П.**, д.т.н., проф., ДГМА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТЯЖЕЛЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Клочко А.А., Мироненко Е.В., Анциферова О.А., Макастрова Л.А., Киреев В.Е.

В статье рассмотрены основные направления по обеспечению повышения качества и точности тяжелых токарных станков с ЧПУ необходимо разрабатывать технологические процессы закаленных цилиндрических колес с учетом технологического обеспечения параметров поверхностного слоя, формирующимся на окончательных этапах их изготовления. Проблема технологического обеспечения требуемого качества поверхностного слоя зависит от выбранной схемы формообразования, характеристики и формы шлифовального круга, режимов резания, применяемой СОЖ, способом и частотой правки шлифовального круга. При изучении процесса формирования поверхностного слоя при различных методах механической обработки зубчатых колес установлено, что при одних и тех же параметрах, которые обеспечивались в ходе обработки различными методами в узлах тяжелых редукторов, зубчатые колеса имели разные эксплуатационные характеристики.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

Клочко О.О., Мироненко Є. В., Анциферова О. О., Макастрова Л.О., Кіреєв В. Є.

У статті розглянуті основні напрямки забезпечення підвищення якості і точності важких токарних верстатів з ЧПУ необхідно розробляти технологічні процеси загартованих циліндричних коліс з урахуванням технологічного забезпечення параметрів поверхневого шару, що формується на завершальних етапах їх виготовлення. Проблема технологічного забезпечення необхідної якості поверхневого шару залежить від обраної схеми формоутворення, характеристики і форми шліфувального круга, режимів різання, застосовуваної СОЖ, способом і частотою правки шліфувального круга. При вивченні процесу формування поверхневого шару при різних методах механічної обробки зубчастих коліс встановлено, що при одних і тих же параметрах, які забезпечувалися в ході обробки різними методами у вузлах важких редукторів, зубчасті колеса мали різні експлуатаційні характеристики.

TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FORMATION OF THE SURFACE LAYER OF THE TOOTHED WHEELS OF HEAVY CNC LATHES

Klochko A. A., Mironenko E. V., Antsiferova O. A., Makatrova L. A., Kireev V. E.

The article describes the main directions for enhancing the quality and precision heavy CNC lathes it is necessary to develop technological processes of hardened cylindrical gears taking into account the technological parameters ensuring the surface layer formed on the final stages of their manufacture. Problem technology to ensure the required quality of the surface layer depends on the selected scheme of formation, characteristics and forms of grinding wheel, cutting data, coolant used, the method and frequency of the grinding wheel. When studying the process of formation of the surface layer with different methods of machining gears installed that with the same settings that were provided during treatment by different methods in the nodes of heavy gears, gears have different performance characteristics.

Ключевые слова: качество, точность, тяжелые токарные станки, технологические процессы, закаленные цилиндрические колеса, параметры, поверхностный слой, шлифовальный круг, режимы резания

Ключові слова: якість, точність, важкі токарні верстати, технологічні процеси, загартовані циліндричні колеса, параметри, поверхневий шар, шліфувальний круг, режими різання

Keywords: quality, precision, heavy duty lathe machines, technological processes, hardened cylindrical wheel, the options, the surface layer, grinding wheel, cutting data

Дата подання статті до редакції: 7 жовтня 2015 р .