
УДК 621.833:621.914.5

Тимофеев Ю.В. д.т.н., проф., Шелковой А.Н. д.т.н., проф., Клочко А.А. к.т.н., доц.
НТУ Украины «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина

НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИН УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Timofeev Yu., Shelkovoy A., Klochko A.
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

SCIENTIFIC PRE-CONDITIONS OF OPREDELNIYA OF TERMS OF FORMING OF SIZES OF THE WORK-HARDENED LAYER AT FORMOOBRAZOVANII OF KRUPNOMODUL'NYKH OF GEAR-WHEELS

Для прогнозирования показателей качества поверхностного слоя разработаны научные предпосылки определения условий формирования величин упрочненного слоя при формообразовании крупномодульных зубчатых колес с учетом технологических, геометрических параметров и физико-механических свойств при условии перехода пластического оттеснения материала из обрабатываемой поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес во взаимосвязи с комплексным параметром состояния поверхностного слоя.

Ключевые слова: показатели качества, поверхностный слой, зубчатые колеса.

Для обеспечения оптимальной долговечности и надежности работы зубчатых цилиндрических передач необходимо придавать их обработанным поверхностям обоснованные геометрические характеристики и физико-механические свойства. Эксплуатационные свойства зубчатых передач зависят на стадии изготовления от точности обработки, марки материала, его структуры и твердости, а также шероховатости поверхностей в зависимости от способа или метода их получения. Проведенные исследования показывают, что одинаковые по точности и высоте шероховатости поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес могут иметь различные эксплуатационные свойства. У поверхностей с одинаковой точной поверхностью могут быть различные степени наклепа, неодинаковый характер и величина остаточных напряжений, разная степень искажения кристаллического строения и степень нарушения цельности поверхности за счет микротрещин, задигов, разрыхления [1-3].

Цель и методика исследования. В работе поставлена цель: разработать и установить основные показатели состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес на процесс долговечности и износоустойчивости зубчатых передач в зависимости от процессов формирования поверхности зубчатых колес, состояния режущей кромки инструмента и режимов резания. Известно влияние на процесс формообразования поверхностного слоя при механической обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес режимов резания, состояния режущей кромки фрез, использования СОЖ. Поверхностный слой подвергается пластическому деформированию и местному кратковременному нагреву. В этом слое возникают остаточные напряжения, которые имеют значительную величину (рисунки 1 и 2). Взаимосвязь макро и микронеровностей с физико-механическими свойствами определяют несущую способность поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес и позволяют установить адекватные зависимости интенсивности износа, прогнозировать долговечность зубчатых передач в зависимости от технологических условий формообразования поверхностного слоя.

Методика технологического обеспечения эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес определяется решением двух задач: во-первых, выбор материалов, твердости рабочих поверхностей зубьев и назначения точности размеров и системы параметров состояния поверхностного слоя, которые обеспечат требуемые эксплуатационные свойства; во-вторых, выбор метода и назначения режимов обработки, обеспечивающих наиболее экономичное и надежное достижение заданной точности размеров и системы параметров состояния поверхностного слоя обрабатываемых закаленных крупномодульных зубчатых колес. Таким образом износоустойчивость закаленных крупномодульных зубчатых колес характеризуется комплексным состоянием поверхностей трения.

В соответствии со сложившимся представлением о процессе приработки поверхностей зубчатых реечных передач, одним из его результатов является образование равновесной шероховатости (рисунки 3 и 4).

Несущая способность поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес, интенсивность износа при трении скольжения наряду с шероховатостью определяются макроотклонением, волнистостью и физико-механическими свойствами (микротвердость и остаточные напряжения) [2]. Поэтому образующаяся шероховатость поверхностей трения в процессе приработки будет зависеть от остальных параметров состояния поверхностного слоя контактирующих деталей. Следовательно, достижение равновесного состояния поверхностного слоя находящихся в зацеплении закаленных крупномодульных зубчатых колес возможно при реализации упругого контакта взаимодействующих тел.

Равновесное состояние поверхностей трения зубчатых колес характеризуется параметром

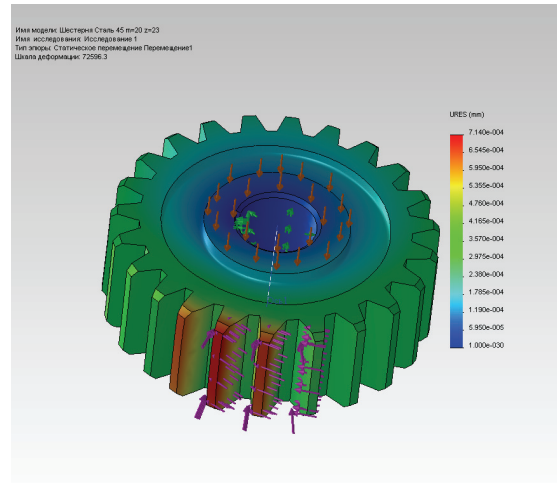
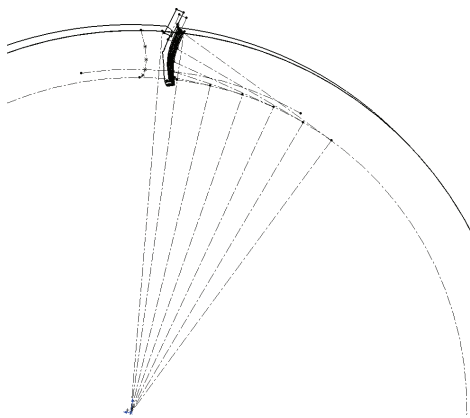
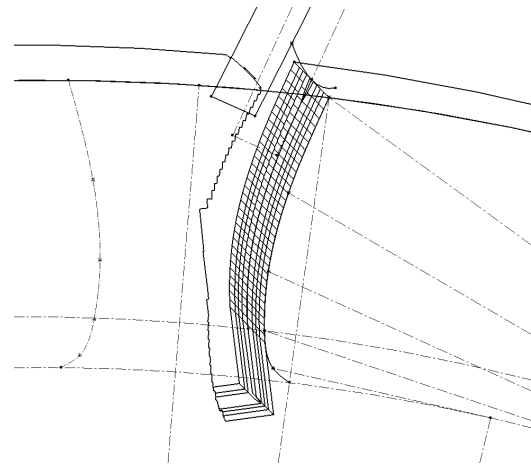


Рис. 2 Возникновение остаточных напряжений в поверхностном слое при статическом нагружении



a



б

Рис.3. Образование равновесной шероховатости эвольвентной поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес

$$C_x = \frac{H_p \cdot W_p \cdot (0,75 \cdot R_z)^4}{S_m^6 \cdot k^{-12}} \quad (1)$$

где H_p – высота сглаживания макроотклонения, W_p – высота сглаживания профиля волнистости, R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам, S_m – средний шаг неровностей, k ($H_{\mu 0}$) – степень упрочнения.

Значение комплексного параметра, обеспечивающего требуемую износостойкость, рассчитывается по формуле

$$C_x = 3375 \cdot \left[\frac{\sigma_s \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^6 \quad (2)$$

где σ_s – напряжение текучести, E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, n – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению поверхности зубчатых колес, I – интенсивность износа зубчатых колес в период нормального износа, χ – коэффициент, учитывающий параметры опорной кривой, p – удельная нагрузка, приходящаяся на геометрическую площадь контакта.

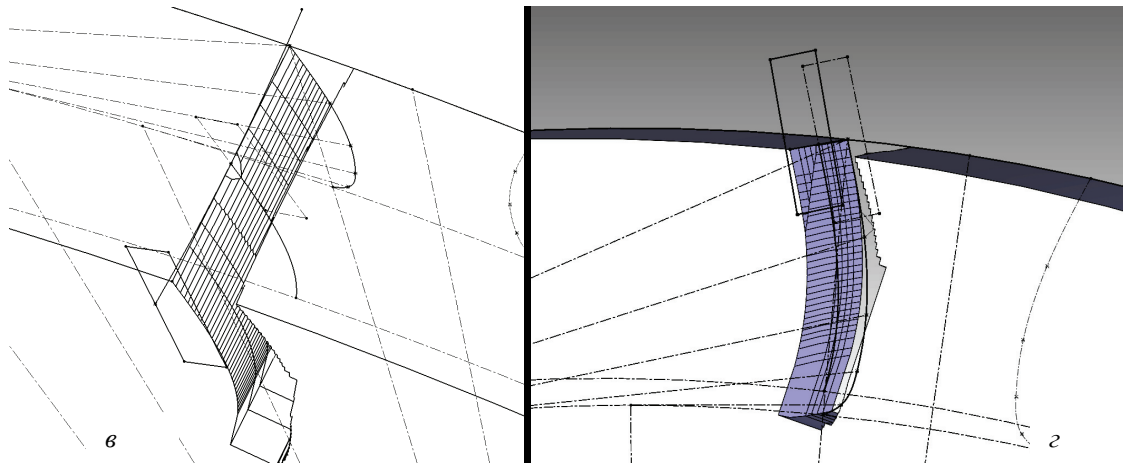


Рис.4. Образование равновесной шероховатости эвольвентной поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес с учетом требуемой износостойкости

Известно, что при трении режущего инструмента при движении по обрабатываемой поверхности зубьев закаленных крупномодульных зубчатых колес изменяются многие свойства как обрабатываемого материала, так и режущего инструмента: структура, сопротивление деформации, твердость, интенсивность диффузионных процессов.

При встречном фрезеровании зубчатых колес процесс врезания (рис. 5.) теоретически осуществляется с нулевой толщины срезаемого слоя. При $a=0$, происходит трение скольжения зуба по обрабатываемой поверхности и каждый последующий зуб работает по наклепанной поверхности, образованной предыдущим зубом, что приводит к изменению свободной энергии и, следовательно, к затрате определенной части энергии на трение.

Установлено, что большая часть работы трения скольжения превращается в теплоту, а с увеличением поверхностной температуры отмечается тенденция роста износа режущей части фрезы. Поэтому с целью повышения эффективности процесса формообразования при фрезеровании закаленных крупномодульных зубчатых колес необходимо определение минимального угла скольжения $\Psi_{ск}$ зубьев фрезы.

Скольжение будет происходить на определенном угле скольжения $\Psi_{ск}$ до тех пор, пока пластические деформации не перейдут в микрорезание и непосредственно резание, т.е. когда толщина среза (a_i) не достигнет определенного значения величины относительного внедрения режущим инструментом, имеющем радиус округления режущего лезвия ρ .

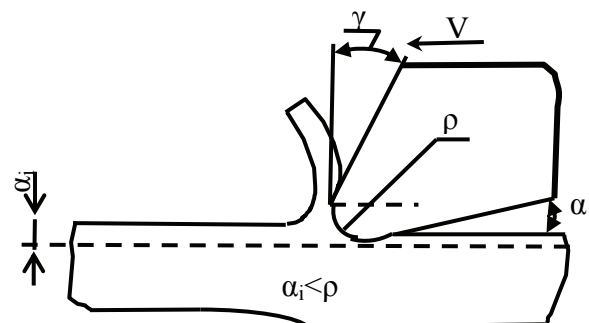


Рис.5. Соотношение между толщиной срезаемого слоя a_i и радиусом округления режущей кромки зуба фрезы ρ

При скольжении зуба фрезы температура в зоне резания резко возрастает, что является одной из причины повышенного износа фрез по задним поверхностям. По достижении определенной толщины слоя a_i на угле скольжения $\Psi_{ск}$ процесс пластической деформации переходит в резание (рис. 6).

Очень важными с точки зрения повышения стойкости инструмента, качества обработанной поверхности, исключения риска, отслаивания поверхностного слоя, обеспечения равновесного состояния поверхностного слоя, является определение угла скольжения $\Psi_{ск}$ для чего необходимо рассмотреть физико-химические процессы механики взаимодействия обрабатываемых зубчатых изделий и инструмента. В процессе снятия стружки деформация слоев обрабатываемого материала возникает не только в области плоскости скалывания, 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.

Согласно теории И.В. Крагельского [3] трение поверхностных слоев трущихся материалов имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Трение обусловлено объемным деформированием материала и преодолением молекулярных связей (мостиков холодной сварки), возникающих между сближенными участками трущихся поверхностей. Если рассматривать внедрившийся элемент - индентор, который, перемещаясь в тангенциальном направлении, деформирует нижележащий материал, как режущее

лезвие с радиусом ρ , а глубину внедрившейся неровности h_i , как a_i , то глубина относительного внедрения h_i/ρ запишется в виде: a_i/ρ (рис. 6).

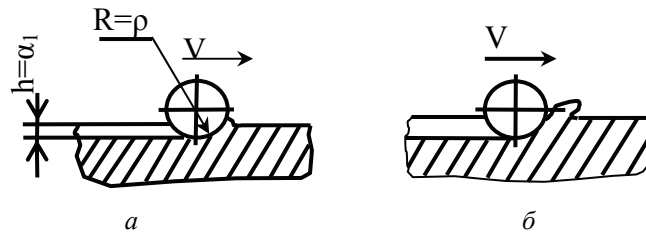


Рис. 6. Перемещение индентора (режущего лезвия) в случае пластической деформации (а) и резания (б)

Очевидно, что угол скольжения $\Psi_{ск}$ соответствует пластическому оттеснению материала, когда материал обтекает индентор (инструмент) без отделения от основной массы. При углублении сферы в материал наступает момент, когда оттеснение (передеформирование) материала сменяется его затормаживанием относительно индентора, что приводит к нагреванию материала.

Рассмотренная теория пластичности о скольжении жесткого сферического индентора, внедряющегося в пластически деформируемое пространство, на границе между которыми действует адгезионная связь, имеющая прочность на срез, определяет условия перехода пластического оттеснения в резание:

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot \tau}{\sigma_s}\right), \quad (3)$$

где $h_i = a_i$ - толщина срезаемого слоя, мм; $R = \rho$ - радиус режущего лезвия, мм; τ - прочность на срез адгезионной связи, н/м²; σ_s - предел текучести материала, н/м².

Как следует из (3), при $\sigma_s \leq 2 \cdot \tau$ внешнее трение невозможно при любом относительном внедрении; оно также невозможно при $h_i/R = a_i/\rho \geq 0,5$ даже при условии нулевой прочности адгезионной связи на срез. При смазывании предельным будет относительное внедрение $h_i/R = a_i/\rho \geq 0,31$: при нарушении внешнего трения в случае $\tau = 0$ и при наличии хорошей смазочной пленки на поверхности раздела коэффициент трения в зависимости от отношения $h_i/R = a_i/\rho$ определяется из молекулярно-механической теории трения:

$$f = \frac{\tau_o}{p_r} + \beta + 0,4 \cdot a_r \cdot \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (4)$$

где τ_o - удельная сдвиговая прочность молекулярных связей; β - коэффициент упрочнения молекулярных связей под действием сжимающих напряжений; a_r - коэффициент гистерезисных потерь при скольжении; p_r - давление на фактических площадках контакта.

Для нашего случая:

$$f = 0,4 \cdot \sqrt{\frac{a_i}{\rho}}, \quad (5)$$

Подставляя в (8) значение $a_i/\rho = 0,31$, при котором невозможно внешнее трение, получим $f = 0,22$. Эта величина является предельным значением деформационной составляющей коэффициента трения. При переходе критического значения, т.е. при $f \geq 0,22$ наблюдаются скачки соприкасающейся поверхности и индентора.

При резании с применением поверхностно и химически активных смазочно-охлаждающих жидкостей адгезионное взаимодействие между стружкой и инструментом отсутствует, адгезионная составляющая равна нулю и средний коэффициент трения становится постоянным, не зависящим от условий резания, т.е. при $\tau/\sigma = f_2 \rightarrow 0$:

$$f = f_1 + f_2 \rightarrow f_1,$$

где f_1 - коэффициент трения, зависящий от молекулярно-атомной шероховатости поверхностей.

Таким образом, глубина относительного внедрения, приводящая к резанию без применения смазки, соответствует $a_i/\rho \geq 0,5$, а со смазкой - $a_i/\rho \geq 0,31$.

Толщина срезаемого слоя $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \phi$, где S_z - подача на зуб; ϕ - угол профиля зуба фрезы.

Задаваясь определенными значениями радиуса режущего лезвия ρ зуба фрезы и подачи на зуб S_z , определяем минимальные значения углов скольжения без СОЖ и с ее применением:

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi};$$

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi}.$$

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 Ψ_{max} с обрабатываемым зубчатым изделием. Соотношение между углом скольжения $\Psi_{ск}$ и наибольшим углом контакта зуба фрезы Ψ_{max} с обрабатываемой поверхностью позволяет установить эффективность процесса формообразования через коэффициент $K_{фр}$ (без применения СОЖ и с СОЖ):

$$K_{фр} = \frac{\sin \Psi_{max} - \sin \Psi_{ск}}{\sin \Psi_{max}} \cdot 100\% .$$

Подставляя в (5) технологические параметры обработки получим, удобное для теоретических и экспериментальных исследований выражение коэффициента эффективности формообразования:

$$K_{фр} = \left(1 - \frac{a \sin \left(K_{сож} \cdot \frac{\rho_i \cdot Z \cdot 10^3 \cdot V}{S_m \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \varphi} \right)}{a \sin \frac{2 \cdot \sqrt{H \cdot (D-H)}}{D}} \right) \cdot 100\% ,$$

где $K_{сож}=0,5$ при обработке без СОЖ, $K_{сож}=0,31$ при обработке с СОЖ.

Благоприятной областью технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес является значение коэффициента эффективности фрезерования $K_{эф}$ от 30% до 80%, что регламентируется радиусом округления режущего лезвия инструмента ρ или величиной износа по задней поверхности, а также режимами резания: подачей, скоростью резания, параметрами шероховатости, силами резания в зависимости от принятой схемы резания [4].

Определение конкретных условий обработки решается во взаимосвязи с функциональными параметрами состояния обрабатываемых поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес. Параметры состояния шероховатости поверхности при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес имеют следующий вид:

$$R_z = 5 \cdot R_a = P_z \cdot \frac{S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \gamma^{0,41}} \cdot K_{фр} \quad (6)$$

$$W_z = P_z \cdot \frac{S_z^{1,01} \cdot a_i^{0,46} \cdot \rho^{0,16} \cdot \gamma^{0,54}}{V^{1,55}} ,$$

где R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам в мм, R_a – средне арифметическое отклонение профиля в мм, W_z – высота сглаживания профиля волнистости по десяти точкам в мм, P_z – главная составляющая силы резания, в н, S_z – подача на зуб в мм/зуб, a_i – толщина срезаемого слоя в мм, ρ – радиус округления режущей кромки в мм, V – скорость резания в м/с, γ – передний угол фрезы в град, $K_{фр}$ – коэффициента эффективности формообразования.

Для прогнозирования показателей качества поверхностного слоя разработана математическая модель с учетом технологических, геометрических параметров и физико-механических свойств при условии перехода пластического отгеснения материала с обрабатываемой поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес во взаимосвязи с комплексным параметром состояния поверхностного слоя, выраженном через параметр шероховатости R_z .

$$R_z = 5 \cdot R_a = \frac{P_z \cdot S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \gamma^{0,41}} \cdot K_{фр} =$$

$$= \frac{10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{3/4} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{3/2} \cdot S_m^{3/2} \cdot k^{-3}}{H_p^{1/4} \cdot W_p^{1/4}} ,$$

где R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам в мм, R_a – средне арифметическое отклонение профиля в мм, W_z – высота сглаживания профиля волнистости по десяти точкам в мм, P_z – главная составляющая силы резания, в н, S_z – подача на зуб в мм/зуб, a_i – толщина срезаемого слоя в мм, ρ – радиус округления режущей кромки в мм, V – скорость резания в м/с, γ – передний угол фрезы в град, $K_{фр}$ – коэффициента эффективности формообразования, σ_T – напряжение текучести, E – модуль упругости, μ – коэффициент Пуассона, n – число циклов воздействия, которое приводит к разрушению поверхности зубчатых колес, I – интенсивность износа

зубчатых колес в период нормального износа, χ – коэффициент, учитывающий параметры опорной кривой, p – удельная нагрузка, приходящаяся на геометрическую площадь контакта, H_p – высота сглаживания макроотклонения, W_p – высота сглаживания профиля волнистости, R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам, S_m – средний шаг неровностей, $k (H_{\mu 0})$ – степень упрочнения.

Эти уравнения адекватно описывают процесс формообразования. Результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические предпосылки механических методов обработки в технологическом обеспечении системы параметров поверхностного слоя деталей зубчатых колес. Значительное влияние на параметры обрабатываемых поверхностей зубчатых колес оказывает технологическая наследственность, что указывает на возможности управления системой параметров обрабатываемых поверхностей на протяжении технологического процесса. Полученные данные используются в качестве технических ограничений по системе параметров поверхностного слоя зубчатых колес, определяющих их эксплуатационные свойства, при выборе технологических методов и режимов обработки.

Выводы: итоги данного исследования показывают необходимость дальнейшего исследования влияния системы параметров поверхностного слоя эвольвентной поверхности закаленных крупномодульных зубчатых колес на долговечность и износостойкость зубчатых передач в зависимости от способа формообразования, состояния режущей кромки фрезы, режимов резания. Позволяют установить систему комплексных параметров равновесного состояния поверхностного слоя технологическими способами обработки, соответствующими техническим требованиям на изготовление зубчатых колес адаптивными с условиями эксплуатации на рабочих осях.

Анотація. Для прогнозування показників якості поверхневого шару розроблені наукові передумови определня умов формування величин зміцненого шару при формоутворенні крупномодульних зубчастих коліс з врахуванням технологічних, геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей за умови переходу пластичного відтиснення матеріалу з оброблюваної поверхні загартованих крупномодульних зубчастих коліс у взаємозв'язку з комплексним параметром стану поверхневого шару.

Ключові слова: крупномодульних зубчастих коліс, зміцнений шар, технологічні властивості, геометричні, фізико-механічні.

Abstract. For providing of optimum longevity and reliability of work of the cylindrical gearings the treated surfaces must provide the required parameters of roughness and fiziko-mechanical properties. The conducted researches show that identical on exactness and height of roughness of surface of hard-tempered krupnomodul'nykh of gear-wheels can be different operating characteristics. At tooling of hard-tempered krupnomodul'nykh of gear-wheels a superficial layer undergoes

In this layer there are remaining tensions which have a considerable size. For the technological providing of operating properties of hard-tempered krupnomodul'nykh of gear-wheels two tasks are decided: at first, choice of materials, to hardness of workings surfaces of points and setting of exactness of sizes and system of parameters the states of superficial layer, which will provide the required operating properties; secondly, choice of method and setting of the modes of treatment, providing most economical and reliable achievement of the set exactness of sizes and system of parameters of the state of superficial layer processed hard-tempered krupnomodul'nykh of gear-wheels. Thus the wearproofness of hard-tempered krupnomodul'nykh of gear-wheels is characterized the complex state of surfaces of friction. Therefore with the purpose of increase of efficiency of process iformoobrazovaniya at milling of hard-tempered krupnomodul'nykh of gear-wheels first it was scientific pre-conditions of opredelniya terms of forming of sizes of the work-hardened layer are first grounded at formoobrazovani of krupnomodul'nykh of gear-wheels.

Keywords: optimum longevity, reliability, fiziko-mechanical properties, roughness, formoobrazovani

1. Тимофеев, Ю. В. Технология зубофрезерования закаленных крупномодульных колес специальными червячными фрезами с минимизирующими параметрами главных режущих кромок / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк, 2010. – Вип. 29. – С. 209–216.
2. Специальные технологии 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.
3. Крагельский, И. В. Узлы трения машин / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – М. : Машиностроение, 1984. – 280 с.
4. Клочко, А. А. Технология чистой лезвийной обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Клочко // Вестник Черниг. гос. технолог. ун-та. – 2011. – № 2(49). – С. 58–68.

REFERENCES

1. Timofeev Ju. V., Klochko A. A., Shapovalov V. F. Naukovi notatki (Scientific notes), Lutsk, 2010, no.29, pp. 209–216.
2. Timofeev Ju. V., Shapovalov V. F., Klochko A. A. Special technology zuboobrabotki coarse-grained quenched wheels, Kramatorsk: DGMA, 2011, 128 p.
3. Kragel'skij I. V., Mihin N. M. Uzly treniya mashin (Friction units of machines), Moscow: Mashinostroenie, 1984, 280 p.
4. Klochko A. A. Bulletin of the Chernihiv State Technological University. 2011, no.2(49), pp. 58–68.