

ОХРИМЕНКО А.А., ГРУЩИНА Е.А., ПИВЕНЬ Л.В., СКИДАН Н.П.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОВЫШЕНИЯ СТЕПЕНИ УПРОЧНЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Поверхностный слой в процессе скоростного зубофрезерования претерпевает неоднократное пластическое деформирование и приводит, в свою очередь, к изменению физико-механических свойств и структуры металла. В соответствии с изменениями, происходящими в поверхностном слое, глубина упрочненного слоя определяется по изменению микротвердости по сечению детали и по изменению характера интерференционных линий на рентгенограммах при послойном травлении исследуемой поверхности в зависимости от скорости резания. Скорость резания выступает как фактор, определяющий скорость осуществления пластической деформации поверхностного слоя. С повышением скорости деформации происходит рост предела прочности и предела текучести конструкционных материалов. Повышение предела текучести снижает пластичность обрабатываемого материала и действует в сторону уменьшения степени упрочнения. С повышением температуры и степени деформации скорость протекания процесса разупрочнения, происходящего за счет рекристаллизации, возрастает. Повышение температуры резания способствует повышению интенсивности процесса разупрочнения и уменьшению степени упрочнения.

Ключевые слова: Скоростное зубофрезерование, поверхностный слой, пластическое деформирование, глубина упрочненного слоя, скорость резания, предел прочности, предел текучести

ОХРИМЕНКО О.А., ГРУЩИНА О.О., ПИВЕНЬ Л.В., СКИДАН Н.П.

ТЕХНОЛОГІЧНІ УМОВИ ПІДВИЩЕННЯ СТУПЕНЯ ЗМІЦНЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС

Поверхневий шар в процесі швидкісного зубофрезерування зазнає неодноразове пластичну деформацію і призводить, у свою чергу, до зміни фізико-механічних властивостей і структури металу. У відповідності з змінами, що відбуваються у поверхневому шарі, глибина зміцненого шару визначається по зміні микротвердості по перерізу деталі і по зміні характеру інтерференційних ліній на рентгенограмах при посаровому травлюванні досліджуваної поверхні в залежності від швидкості різання. Швидкість різання виступає як фактор, що визначає швидкість здійснення пластичної деформації поверхневого шару. З підвищенням швидкості деформації відбувається зростання межі міцності і межі плинності конструкційних матеріалів. Підвищення межі текучості знижує пластичність оброблюваного матеріалу і діє в бік зменшення ступеня зміцнення. З підвищенням температури і ступеня деформації швидкість протікання процесу знеміцнення, що відбувається за рахунок рекристалізації, зростає. Підвищення температури різання сприяє підвищенню інтенсивності процесу знеміцнення і зменшення ступеня зміцнення.

Ключові слова: Швидкісне зубофрезерування, поверхневий шар, пластичне деформування, глибина зміцненого шару, швидкість різання, границя міцності, границя текучості

OKHRIMENKO A.A., GRUSHCHINA E.A., PIVEN L.V., SKYDAN N.P.

TECHNOLOGICAL CONDITIONS OF INCREASING THE DEGREE OF STRENGTHENING OF CYLINDRICAL GEAR WHEELS

The surface layer during high-speed milling undergoes repeated plastic deformation and leads, in turn, to changes in the physico-mechanical properties and structure of metals. In accordance with changes in the surface layer, the depth of the hardened layer is determined by the change of microhardness across the section of the workpiece and to change the nature of the interference lines on radiographs during layer-by-layer etching of the sample surface depending on the cutting speed. The cutting speed is the factor that determines the speed of implementation of plastic deformation of the surface layer. With increasing strain rate increases tensile strength and yield strength of structural materials. The increase of the yield stress reduces the plasticity of the processed material and acts in the direction of decreasing the degree of hardening. With increasing temperature and the degree of deformation speed of the process of softening which occurs due to the recrystallization increases. The temperature of the cutting improves the intensity of the process of softening and reduction in the degree of hardening.

Keywords: Speed gear milling, surface layer, plastic deformation, the depth of the hardened layer, the cutting speed, the tensile strength, yield strength

1. Введение. Технологические факторы, влияющие на глубину и степени упрочнения поверхностного слоя в значительной степени зависят от многих технологических факторов – элементов режима резания, геометрических параметров инструмента и состояния его режущего лезвия зуба фрезы, свойств инструментального и обрабатываемого материалов, вида смазывающе-охлаждающих жидкостей и схемы охлаждения [1, 2, 3].

2. Основная часть. При всех методах механической обработки цилиндрических зубчатых колес на степень их упрочнения будут оказывать влияние силовой и температурный факторы (рис. 1).

Учитывая, что почти все инструменты (фрезы, оснащенные режущими пластинками из твердого сплава и минералокерамики, ролики), применяемые при механической обработке, имеют скругленный рабочий участок с заданной величиной радиуса, для

определения упрочнения поверхностного слоя от силового фактора произведем моделирование рабочей части фрезы сферическим индентором [5, 12, 14, 15]. При вдавливании сферического индентора в поверхность материала усилие, действующее на него, связано с диаметром отпечатка:

$$P = m d_0^n, \quad (1)$$

где d_0 – диаметр отпечатка; m и n – коэффициенты, зависящие от свойств материала.

Выразив диаметр отпечатка через площадь пластического отпечатка, получим:

$$P = m \frac{4A_r}{\pi} \frac{n}{2}. \quad (2)$$

Усилие деформирования в соответствии с разработанной теорией контактного взаимодействия:

$$P = c' k \sigma_T A_r. \quad (3)$$

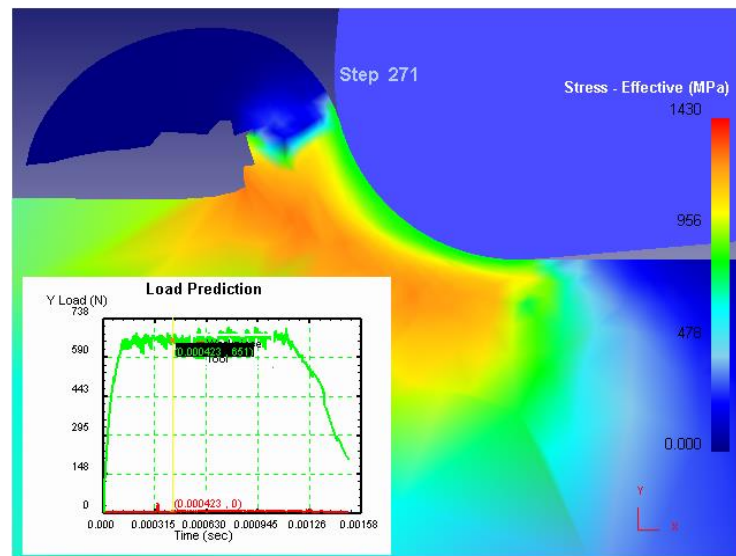


Рис. 1 – Изменение макронапряженности поверхностного слоя при внедрении режущего клина в обрабатываемую поверхность зубчатого колеса

Подставляя (2) в (3), получим уравнение для определения степени упрочнения:

$$k = \frac{m}{0,6c'\sigma_T} \left(\frac{4}{\pi}\right)^{n/2} A_r^{(n/2-1)}, \quad (4)$$

где $0,6$ – коэффициент, учитывающий переход пластических деформаций на основе выступов шероховатости.

Таким образом, (3) является исходным для расчета степени упрочнения при зубофрезеровании без учета температурных изменений [2, 3].

Площадь A_r в каждом конкретном случае определяется условиями обработки. Коэффициенты m и n определяются при испытании на твердость по Раквеллу (HRC) при различных нагрузках. Так, для некоторых материалов значения этих коэффициентов приведены ниже:

Таблица 1 – Значение коэффициентов, определяющие твердость металла

Марка стали:	40	45	40X	18ХНЗА	34ХМ	3Х13	1Х18Н9Г	38Х1Н
m	44	56	63	135	75	61	40	63
n	2,32	2,31	2,32	2,31	2,29	2,31	2,26	2,32

При зубофрезеровании площадь контакта фрезы с обрабатываемым цилиндрическим зубчатым колесом, определяющая степень упрочнения:

$$A_r = \left[\arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{\rho}\right) + h_3 \frac{\Delta h_{уп}}{\sin \alpha} \right] \times \left[\frac{t - R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos\left(1 - \frac{R_z}{r}\right) \right] \quad (5)$$

где Δh – упруго-пластический оттесняемый слой обрабатываемого материала; h_3 – износ по задней поверхности фрезы; $\Delta h_{уп}$ – величина упругого восстановления, рассчитываемая по формуле:

$$\Delta h_{уп} = 2,4(1 - \mu^2) \left(\frac{HB}{E}\right)^2. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим уравнение для расчета площади фактического контакта инструмента с заготовкой при зубофрезеровании:

$$A_r = \left[\arccos\left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T}\right) + h_3 + \frac{2,4\rho(1-\mu^2)}{\sin \alpha} \left(\frac{HB}{E}\right)^2 \right] \times \left[\frac{t - R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos\left(1 - \frac{R_z}{\rho}\right) \right] \quad (7)$$

При скоростном зубофрезеровании площадь контакта фрезы с заготовкой [4, 8, 9]:

$$A_r = \left[\arccos\left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T}\right) + \frac{\pi \arccos\left[1 - 24(1-\mu^2)\left(\frac{HB}{E}\right)^2\right]}{90} \right] \times \frac{\pi \arccos\left(1 - \frac{R_z}{\rho}\right)}{90} \quad (8)$$

При ППД обработке площадь фактического контакта инструмента с заготовкой:

$$A_r = \pi R \frac{t_{m \text{ исх}}}{100} \left(\frac{h_{\text{пл}}}{R_{p \text{ исх}}} \right)^{v_{\text{исх}}} \times \left\{ h_{\text{киц}} \frac{180 - \arccos \cos \frac{S - a_{\text{пл}}}{a_{\text{пл}}}}{180} + h_{\text{упр}} \left[1 - \frac{180 - \arccos \cos \frac{S - a_{\text{пл}}}{a_{\text{пл}}}}{180} \right] \right\} \quad (9)$$

Подставляя (7) в (4), получим уравнение для расчета степени упрочнения при лезвийной зубообработке от силового фактора:

$$k = \frac{m}{0,6c' \sigma_T} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{n/2} \left\{ \left[\arccos \cos \left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) + h_3 + \frac{2,4\rho(1-\mu^2)}{\sin \alpha} \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \right] \times \left[\frac{t - R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos \cos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right) \right] \right\}^{(n/2-1)} \quad (10)$$

Для расчета степени упрочнения от силового фактора при скоростном зубофрезеровании [4, 6, 7, 15]:

$$k = \frac{m}{0,6c' \sigma_T} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{n/2} \left\{ \left[\arccos \cos \left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) \right] + \frac{\pi \rho \arccos \cos \left[1 - 24(1-\mu^2) \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \right]}{90} \times \frac{\pi \rho \arccos \cos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right)}{90} \right\}^{(n/2-1)} \quad (11)$$

Взаимосвязь параметров поверхностей цилиндрических зубчатых колес (рис. 2) с условиями их обработки фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава, приведено в табл. 1.

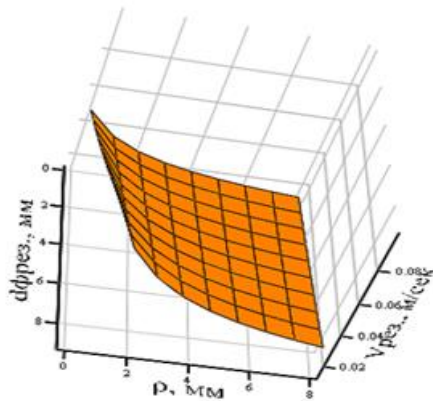


Рис. 2 – Многопараметрическая функция параметров формообразования при зубообработке (попутное фрезерование)

Влияние технологических факторов на параметры качества эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес при скоростном зубофрезеровании фрезами [3, 10, 11, 13], оснащенными режущими пластинками из минералокерамики приведено в табл. 2.

Примечания:

1. Знак «+» обозначает, что увеличение (или уменьшение) данного условия обработки способствует увеличению или уменьшению определенного параметра качества поверхности.

2. Знак «-» обозначает, что увеличение (или уменьшение) данного условия обработки способствует уменьшению или увеличению определенного параметра качества поверхности.

3. Знак «0» обозначает, что изменение данного условия обработки не оказывает влияния на определенные параметры качества поверхности.

4. Знаком «*» помечены условия обработки, оказывающие основное влияние на определенные параметры качества поверхности. Так, для фрез с прецизионной доводкой по передним и задним поверхностям, заточенных алмазным кругом, радиус округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho = 3 \dots 10$ мкм, для червячных модульных фрез изготовленных из быстрорежущей стали Р6М5, с износом по задней поверхности $0,1 \dots 0,3$ мм радиус округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho = 20 \dots 60$ мкм; для червячных модульных твердосплавных фрез Т15К6, ВК10ОМ радиус округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho = 80 \dots 450$ мкм.

Рассмотренные факторы, воздействуя на деформацию поверхностного слоя, проявляются в зависимости от режимов резания, марки обрабатываемого и инструментального материалов, геометрии инструмента и др.

Таким образом, металл, образующий поверхностный слой в процессе резания, претерпевает неоднократное пластическое деформирование. Это приводит, в свою очередь, к изменению всех физико-механических свойств и структуры металла. Согласно дислокационной теории, упрочнение металла при наклепе заключается в концентрации дислокаций около линий сдвигов. Атомные слои в месте расположения дислокаций упруго искажены таким образом, что возникает локальный концентратор напряжений. При пластической деформации число дислокаций в металле может увеличиться на несколько порядков. Если в недеформированном металле средняя плотность дислокаций $j = 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$, то в наклепанном металле она возрастает до $j = 10^{14} \text{ см}^{-2}$. В результате увеличения плотности дислокаций и взаимодействия их силовых полей и происходит упрочнение металла при пластическом деформировании [1, 3, 8].

Таблица 1 – Взаимосвязь параметров поверхностей цилиндрических зубчатых колес с условиями их обработки фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава

Условия обработки	Геометрические характеристики обработанной поверхности												Параметры физикомеханических свойств поверхностного слоя			
	Параметры шероховатости						Параметры волнистости			Параметры микроотклонения						
	R_a	R_z	R_{max}	S_m	S	t_p	R_p	W_z	W_m	S_{mw}	H_{max}	H_p	$H_{\mu 0}$	h_{μ}	$\sigma 0$	h_{σ}
Подача S , мм/мин < 50 ≥ 50	0 +*	0 +*	0 +*	+* +*	+* +*	0 0	- +*	0 +*	0 +*	0 +*	0 +*	0 +*	+ -*	+ +*	+ -*	+ +*
Скорость резания v , м/с $< 0,80$ $\geq 0,80$	+* -*	+* -*	-* -	+ -*	+ -*	- -	+* -*	+* -*	-* -	-* +	- +	-* +	-* +	+ +*	+ +*	+ +*
Глубина резания t			+*			+			+*	+*	+*	+*	+*			
Передний угол фрезы > 0 < 0	- +*	- +*		- +*	- +*	0	+* +*	+* +*	+* +*	+* +*					+* +*	+* +*
Радиус скругления режущей кромки ρ			+*			+							+*			
Шероховатость режущей кромки $R_{z_{кр}}$			-			0			+	+	+*	+	+	+	+	+
Жесткость системы ДТСС	+*	+*	+	+*	+	0	+	+	0	0	+0	+	0	0	0	0

Таблица 2 – Влияние технологических факторов на параметры качества эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес при скоростном зубофрезеровании фрезами, оснащенными режущими пластинками из минералокерамики

Условия обработки	Геометрические характеристики обработанной поверхности												Параметры физикомеханических свойств поверхностного слоя			
	Параметры шероховатости						Параметры волнистости			Параметры микроотклонения						
	R_a	R_z	R_{max}	S_m	S	t_p	R_p	W_z	W_m	S_{mw}	H_{max}	H_p	$H_{\mu 0}$	h_{μ}	$\sigma 0$	h_{σ}
Минутная подача $S_{мин}$	+*	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Подача на оборот S_o	+*	+*	+*	+*	+*	0	+*	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Подача на зуб фрезы S_z	+*	+*	+*	+	+	0	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+*	+	+
Встречное фрезерование	+*	*	+*	+*	+*	+	+*	+*	+*	+*	+*	+*		0	+*	+*
Попутное фрезерование	-	-	-	0	0		+*	+*	+*	+*	+	+	0	0	0	0
Жесткость системы ДТСС	-	-	-			0	-	+*	-*	0	-*	-*	-*	-*	-*	-*
Предел текучести материала заготовки σ_t	-	-	-	-	-	0	-	+	+	+	+	+	+*	+*	+*	+*
Исходная волнистость $W_{z_{исх}}$	+*	+*	+*	+*	+*	-	+*	0	0	0	0	+*	+*	+*	+*	+*
Исходное макроотклонение $H_{max_{исх}}$	0	0	0	0	0								+	+		
Исходная шероховатость $R_z_{исх}$	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0	0	+	+

Причиной деформации поверхностного слоя (а следовательно, и упрочнения) является то, что резание металлов осуществляется зубом фрезы с радиусом округления режущей кромки ρ и частичное упругое восстановление несрезанного деформированного металла. Таким образом, металл, образующий поверхностный слой в процессе резания, претерпевает неоднократное пластическое деформирование. Это приводит, в свою очередь, к изменению всех физико-механических свойств и структуры металла. Согласно дислокационной теории, упрочнение металла при наклепе заключается в концентрации дислокаций около линий сдвигов. Атомные слои в месте расположения дислокаций упруго искажены таким образом, что возникает локальный концентратор напряжений. При пластической деформации число дислокаций в металле может увеличиться на несколько порядков. Если в недеформированном металле средняя плотность дислокаций $j = 10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$, то в наклепанном металле она возрастает до $j = 10^{14} \text{ см}^{-2}$. В результате увеличения плотности дислокаций и взаимодействия их силовых полей и происходит упрочнение металла при пластическом деформировании [1, 3, 8].

Степень упрочнения характеризуется глубиной пластически деформированного поверхностного слоя h_c и степенью наклепа N , определяемой по формуле:

$$N = \frac{H_1 - H}{H} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где H_1 – микротвердость детали непосредственно с поверхности; H – микротвердость поверхностного слоя на глубине залегания h_c .

В соответствии с изменениями, происходящими в поверхностном слое, глубина упрочненного слоя определяется или по изменению микротвердости по сечению детали, или по изменению характера интерференционных линий на рентгенограммах при послышной стравливании исследуемой поверхности.

Применительно к встречному зубофрезерованию формула для определения глубины наклепанного слоя имеет следующий вид:

$$h_n = \frac{1 - \sin \beta}{2 \sin \beta} \cdot \sin \psi_{\tilde{n}e}, \quad (13)$$

где $\psi_{ск}$ – угол скольжения.

Угол сдвига β рассчитывается по формуле:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \cdot \sin \psi_{ск}, \quad (14)$$

где ξ – усадка стружки; γ – передний угол фрезы.

Формула (12) справедлива, когда отношение глубины относительного внедрения, приводящего к резанию без применения смазки, соответствует $a_i/\rho \geq 0,5$, а со смазкой – $a_i/\rho \geq 0,31$. Толщина срезаемого слоя $a_i = S_z \cdot \sin \psi_{ск} \cdot \sin \varphi$.

Скорость резания выступает как фактор, определяющий скорость осуществления пластической деформации поверхностного слоя. С повышением скорости деформации, как известно, происходит рост

предела прочности и предела текучести конструкционных материалов. Повышение предела текучести снижает пластичность обрабатываемого материала и действует в сторону уменьшения степени упрочнения.

Скорость резания определяет продолжительность контакта задней поверхности фрезы с изделием. При большой скорости резания поверхность детали проходит через зону контакта, не получив степени упрочнения, который она могла бы получить при малой скорости резания и более продолжительном контакте.

При повышении скорости резания до некоторой величины происходит сужение пластической зоны и уменьшение глубины ее распространения ниже линии среза. То и другое действует в сторону уменьшения степени упрочнения [1, 12].

Скорость резания, как температурный фактор, изменяет степень развития нароста при зубофрезеровании червячными модульными фрезами из быстрорежущей стали Р6М5 и характер обтекания и подминания металла из зоны стружкообразования в сторону задней грани. Степень упрочнения увеличивает действительный радиус округления режущей кромки и тем самым способствует повышению наклепа.

Скорость резания влияет на изменение интенсивности процесса разупрочнения (Рис. 3).

При пластическом деформировании в поверхностных слоях металла происходят два одновременно протекающих процесса: степень упрочнения и разупрочнение. С повышением температуры и степени деформации скорость протекания процесса разупрочнения, происходящего за счет рекристаллизации, возрастает. Повышение температуры резания способствует повышению интенсивности процесса разупрочнения и уменьшению степени упрочнения.

При встречном зубофрезеровании на угле скольжения зуба фрезы $\psi_{ск}$ повышение температуры контакта до температуры, соответствующей максимальному охрупчиванию, будет способствовать снижению степени упрочнения, а дальнейшее повышение температуры должно действовать в сторону повышения наклепа, т. к. пластичность в этом случае повышается.

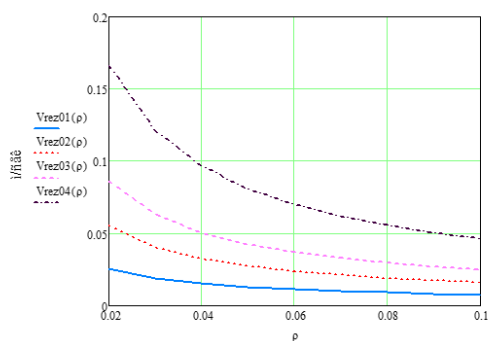


Рис. 3 – График зависимости параметров формообразования от радиуса округления режущей кромки фрезы

Выводы. В процессе скоростного зубофрезерования поверхностный слой претерпевает неоднократное пластическое деформирование и приводит, в свою очередь, к изменению физико-механических свойств и структуры металла. В соответствии с изменениями, происходящими в поверхностном слое, глубина упрочненного слоя определяется по изменению микротвердости по сечению детали и по изменению характера интерференционных линий на рентгенограммах при последнем сравнении исследуемой поверхности в зависимости от скорости резания. Скорость резания выступает как фактор, определяющий скорость осуществления пластической деформации поверхностного слоя. С повышением скорости деформации происходит рост предела прочности и предела текучести конструкционных материалов. Повышение предела текучести снижает пластичность обрабатываемого материала и действует в сторону уменьшения степени упрочнения. С повышением температуры и степени деформации скорость протекания процесса разупрочнения, происходящего за счет рекристаллизации, возрастает. Повышение температуры резания способствует повышению интенсивности процесса разупрочнения и уменьшению степени упрочнения.

Список литературы:

1. Ключко А. А. *Технологическое основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес* [Текст] / А. А. Ключко, 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.
2. Шелковой А. Н. *Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес* / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ ХПІ, 2013. – Вип. 8. – С. 185–200. – Укр., рос., англ. мовами.
3. Мироненко Е. В. *Топографія износа зубонарезного инструмента при формообразовании зубчатых реек* / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем*: сб. науч. тр. – Краматорск: К.: ДГМА, 2008. – Вип. 23. – С. 69–73.
4. *Масляная СОЖ при зубообработке: эффективность и перспективы их применения*. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, А. Г. Суслов, А. А. Ключко [и др.] // *Международный информационно-технический журнал*. – Харьков, 2008. – № 5. – С. 70–73.
5. Шелковой А.Н., Пермяков А.А., Ключко А.А., Басова Е.В., Перминов Е.В. *Глобальный метод повышения эффективности эксплуатации цилиндрических и конических зубчатых передач* // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Технології в машинобудуванні – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр./ Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 34 (1310) 2018. – С. 67–76. – ISSN 2079-004X.
6. Ключко О.О., Шелковой А.Н., Лоза Р.І, Півень Л.В. *Технологія автоматизованого виробництва в системі проектування керуючих процесів для верстатів з ЧПУ*. Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції 31 жовтня – 02 листопада 2018 року/ Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 75–77.
7. Пермяков А.А., Ключко А.А., Гасанов М.И. *Математическая модель синтеза технологического регламента восстановления функциональных свойств крупномодульных зубчатых передач*. XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня – 01 липня 2018 року в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – Т. 4. – С. 348–350.
8. Новиков Ф.В., Ключко О.О., Охрименко О.А., Анциферова О.О., Басова Е.В. *Математична модель теплонапруженості процесу імпульсного переривчастого шліфування*. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр./ Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 127–132. – ISSN 2079-004X.
9. *Застосування CAD систем при визначення параметрів зрізючого шару при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами* / Н.С. Равська, О.О. Ключко, О.А. Охрименко // *Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів VII-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції*, 5-9 лютого 2018 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – С. 135–137.
10. *Актуальність диференційованого і комплексного пронозирования в умовах імітаційного моделювання технологического обеспечения эксплуатационных свойств крупномодульных зубчатых колес* / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, А.А. Охрименко, М.И. Гасанов // *Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів VII-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції*, 5-9 лютого 2018 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – С. 127–129.
11. Степанов М. С. *Многокритериальная регламентация параметров поверхностного слоя деталей* / М. С. Степанов, А. А. Ключко, А.Н. Кравцов // *Физические и компьютерные технологии*. Труды 21-й Международной научно-практической конференции. 24–25 декабря 2015, г. Харьков. – Д.: Лира, 2015. – С. 68–76. – ISBN 978-966-383-658-4.
12. Ratnadeepsinh, M.J., Dispeshkumar M.C., & Jignesh D.L. (2013). *Bending Stress Analysis of Bevel Gears*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 2(7), 341-346.
13. Artoni, M. Gabiccini, M. Kolivand. *Ease-off based compensation of tooth surface deviations for spiral bevel and hypoid gears: only the pinion needs corrections*. Mech. Mach. Theory 61 (2013) 84–101.
14. Z. Zhou, J. Tang, H. Ding. *Accurate modification methodology of universal machine tool settings for spiral bevel and hypoid gears*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. 232 (2) (2018) 339–349.
15. V. Simon. *Design of face-hobbed spiral bevel gears with reduced maximum tooth contact pressure and transmission errors*. Chin. J. Aeronaut. 26 (2013) 777–790.

References (transliterated)

1. Klochko A. A. *Tekhnologicheskoe osnovy` obespecheniya proczessa zuboobrabotki zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles* [Tekst] / A. A. Klochko, A. N. Kravczov. Donbasskaya gosudarstvennaya mashinostroitel`naya akademiya; Zakry`toe akczionerное ob-vo "ONIKS" - Kramatorsk: DGMA; Irbit: ONIKS, 2014 – 299 s.: il., tabl.; - (Seriya: «Proektirovanie i primenenie rezhushhego instrumenta v mashinostroenii» / Obshh. red. Yu.M. Solomenczev). ISBN 978-5-906703-02-6.
2. Shelkovej A. N. *Kriterii formirovaniya struktur i parametrov sistem obrabotki, obespechivayushhikh zadannye` ekspluataczionnye` svojstva zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles* / A. N. Shelkovej, E. V. Mironenko, A. A. Klochko // *Vі`snik Naczi`onal`nogo tekhnі`chnogo unі`versitetu «Kharki`vs`kij poli`tekhnі`chnij і`nstytut»*: zb. nauk. pr. Tematichnij vipusk: Suchasni` tekhnologiyi v mashinobuduvanni`. – Kharki`v : NTU KhPI, 2013. – Vip. 8. – S. 185–200. – Ukr., ros., angl. movami.
3. Mironenko E. V. *Topografija iznosa zubonarezного instrumenta pri formoobrazovanii zubchaty`kh reek* / E. V. Mironenko, A. A. Klochko // *Nadezhnost` instrumenta i optimizaciya*

- tehnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk : K. : DGMA, 2008. – Vy'p. 23. – S. 69–73.
4. Maslyanaya COZh pri zuboobrabotke: e'ffektivnost' i perspektivy ikh primeneniya. Metalloobrabotka. Oborudovanie i instrument dlya professionalov/ E. V. Mironenko, A. G. Suslov, A. A. Klochko [i dr.]/ Mezhdunarodny'j informacziionno-tehnicheskij zhurnal. – Khar'kov, 2008. – # 5. – S. 70–73.
 5. Shelkovej A.N., Permyakov A.A., Klochko A.A., Basova E.V., Perminov E.V. *Global'ny'j metod povy'sheniya e'ffektivnosti e'kspluataczii czilindricheskikh i konicheskikh zubchaty'kh peredachil/ Vi'snik Naczi'onal'nogo tekhnichnogo uni'versitetu «KhPI»*. Seriya: Tekhnologiyi v mashinobuduvanni' – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr./ Nacz. tekhn. un-t «Kharki'v. poli'tekhn. i'n-t». — Kharki'v : NTU «KhPI», 2018. – # 34 (1310) 2018. – S. 67–76. – ISSN 2079-004Kh.
 6. Klochko O.O., Shelkovej O.M., Loza R.I., Pi'ven' L.V. *Tekhnologiya avtomatizovanogo virobnicztva v sistemii proektuvannya keruyuchikh procesiv dlya verstativ z ChPU*. Mashinobuduvannya ochima molodikh: progresivni' i'deyi – nauka – virobnicztvo. Materi'ali mi'zhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferenczi'yi 31 zhovtnya – 02 listopada 2018 roku/ Pi'd zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramatorsk: DDMA, 2018. – S. 75–77.
 7. Permyakov A.A., Klochko A.A., Gasanov M.I. *Matematicheskaya model' sinteza tekhnologicheskogo reglamenta vosstanovleniya funkczional'ny'kh svojstv krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh peredach*. XI Kh Mi'zhnarodna naukovo-tekhni'chna konferenczi'ya «Progresivna tekhnika, tekhnologiya ta i'nzhenerna osvita», 29 chervnya – 01 lipnya 2018 roku v Naczi'onal'nomu tekhnichnomu uni'versiteti' Ukraini «Kiyiv'skij poli'tekhnichnij i'nstitut i'meni' I'gorya Si'kors'kogo». – Kiyiv: NTUU «KPI», 2018. – T. 4. – S. 348–350.
 8. Novikov F.V., Klochko O.O., Okhri'menko O.A., Anciferova O.O., Basova Ye.V. *Matematichna model' teplonapruzhenosti' procesu i'mpul'snogo pererivchastogo shli'fuvannya*. Vi'snik Naczi'onal'nogo tekhnichnogo uni'versitetu «KhPI». Seriya: Tekhnologiyi v mashinobuduvanni' Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr./ Nacz. tekhn. un-t «Kharki'v. poli'tekhn. i'n-t». – Kharki'v : NTU «KhPI», 2018. – # 6 (1282) 2018. – S. 127–132. – ISSN 2079-004Kh.
 9. *Zastosuvannya CAD sistem pri viznachenniya parametriv zri'zayemogo sharu pri zuboofrezuvanni' cherv'yachnimi frezami/ N.S. Rav's'ka, O.O. Klochko, O.A. Okhri'menko/ Zbi'rnik naukovikh prac'v. Progresivni' tekhnologiyi v mashinobuduvanni': Tezi dokladi'v VII'-oyi Vseukrayins'koyi naukovo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi, 5-9 lyutogo 2018 r. – Naczi'onal'nij uni'versitet «L'vi'vs'ka poli'tekhnika». – L'vi'v, 2018. – S. 135–137.*
 10. *Aktual'nost' differenczirovannogo i kompleksnogo prognozuvannya v usloviyakh imitacziionnogo modelirovaniya tekhnologicheskogo obespecheniya e'kspluataczionny'kh svojstv krupnomodul'ny'kh zubchaty'kh koles/ A.A. Permyakov, A.N. Shelkovej, A.A. Klochko, A.A. Okhri'menko, M.I. Gasanov/ Zbi'rnik naukovikh prac'v. Progresivni' tekhnologiyi v mashinobuduvanni': Tezi dokladi'v VII'-oyi Vseukrayins'koyi naukovo-tekhni'chnoyi konferenczi'yi, 5-9 lyutogo 2018 r. – Naczi'onal'nij uni'versitet «L'vi'vs'ka poli'tekhnika». – L'vi'v, 2018. – S. 127–129.*
 11. Stepanov M. S. *Mnogokriterial'naya reglamentacziya parametrov poverkhnostnogo sloya detalej/ M. S. Stepanov, A. A. Klochko, A.N. Kravczov/ Fizicheskie i komp'yuternye tekhnologii. Trudy' 21-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferenczii. 24–25 dekabrya 2015, g.Khar'kov. – D.: Lira, 2015. –S. 68–76. – ISVN 978-966-383-658-4.*
 12. Ratnadeepsinh, M.J., Despeshkumar M.C., & Jignesh D.L. (2013). *Bending Stress Analysis of Bevel Gears*. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 2(7), 341-346.
 13. Artoni, M. Gabiccini, M. Kolivand. *Ease-off based compensation of tooth surface deviations for spiral bevel and hypoid gears: only the pinion needs corrections*. Mech. Mach. Theory 61 (2013) 84–101.
 14. Z. Zhou, J. Tang, H. Ding. *Accurate modification methodology of universal machine tool settings for spiral bevel and hypoid gears*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf. 232 (2) (2018) 339–349.
 15. V. Simon. *Design of face-hobbed spiral bevel gears with reduced maximum tooth contact pressure and transmission errors*. Chin. J. Aeronaut. 26 (2013) 777–790.

Поступила (received) 05.04.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Охріменко Олександр Анатолійович (Охрименко Александр Анатольевич, Ohrimenko Oleksandr) –

доктор технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 267-69-43; e-mail: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987

Грущина Олена Олександрівна (Грущина Елена Александровна, Grushchina Elena Alexandrovna) –

магістр, Columbia University, м. Нью Йорк, e-mail: borbasph@gmail.com

Півень Лариса Володимирівна (Пивень Лариса Владимировна, Piven Larisa Vladimirovna) – магістр,

Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), м. Харків, e-mail: pivenolesy1971@gmail.com

Скидан Наталія Павлівна (Скидан Наталия Павловна, Skydan Nataliia Pavlivna) – інженер кафедри

«Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Національного технічного університету «Харківського політехнічного інституту», м. Харків; тел.: (067)315-21-02; e-mail: s-n-p@i.ua, ORCID: 0000-0002-1775-1447