

УДК 621.923

А.А.КЛОЧКО, М.И.ГАСАНОВ, Е.В. БАСОВА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ВЫБОРА И НАЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗАКАЛЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Наведено аналітичні та експериментальні залежності для визначення технологічного регламенту вибору і призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні з урахуванням забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару зубчастих коліс і визначення оптимальних умов зубофрезерування, при яких забезпечується повне участь в зніманні припуску при зубофрезеруванні всіх зубів фрези. Технологічний регламент вибору і призначення параметрів зубообробки розроблений на науковій основі технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару циліндричних, загартованих зубчастих коліс і гарантує: забезпечення високої продуктивності при максимальній стійкості інструменту, технологічне забезпечення параметрів поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс при максимальній оброблюваності, високу технологічну стабільність зубообробного обладнання і інструменту при обробці циліндричних зубчастих коліс.

Ключові слова: технологічний регламент, параметри обробки, зубофрезерування, поверхневий шар, загартовані зубчасті колеса, продуктивність, стійкість інструмента, зубооброблювальне обладнання.

Приведены аналитические и экспериментальные зависимости для определения технологического регламента выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя зубчатых колес и определения оптимальных условий зубофрезерования, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска при зубофрезеровании всех зубьев фрезы. Технологический регламент выбора и назначения параметров зубообробки разработан на научной основе технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических, закаленных зубчатых колес и гарантирует: обеспечение высокой производительности при максимальной стойкости инструмента, технологическое обеспечение параметров поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при максимальной обрабатываемости, высокую технологическую стабильность зубообрабатывающего оборудования и инструмента при обработке цилиндрических зубчатых колес.

Ключевые слова: технологический регламент, параметры обработки, зубофрезерование, поверхностный слой, закаленные зубчатые колеса, производительность, стойкость инструмента, зубообрабатывающее оборудование.

The analytical and an experimental dependence to determine production schedules selection and appointment of the processing parameters for hobbing with a view to ensuring the required parameters of the surface layer of gears and gear milling determine the optimum conditions under which ensured full participation in the stock removal at all hobbing cutter teeth. Production schedules selection and appointment settings gear treatment developed on a scientific basis of technological maintenance of the surface layer state parameters of cylindrical hardened gears and guarantees: to provide high performance with maximum tool life, technological maintenance of the surface layer of cylindrical gears parameters for maximum workability, high technological stability of gear cutting the processing tool and spur gears.

Keywords: production schedules, processing options, hobbing, surface layer hardened gears, productivity, tool life, gear machinery.

Постановка проблеми. При назначении параметров состояния контактирующих поверхностей цилиндрических зубчатых колес и при разработке технологических процессов их обработки необходимо знать возможности технологических методов по обеспечению этих параметров.

Анализ последних исследований и публикаций. На основании проведенных экспериментов приведены обобщенные данные для эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес из конструкционных и легированных сталей при механических методах их обработки (табл. 1) [1, 2, 5].

Цель работы – аналитическое определение технологического регламента выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес.

Изложение основного материала. Экспериментальные исследования показали связь между собой высотных параметров шероховатости R_a , H_p – высоты сглаживания макроотклонения, W_p – высоты сглаживания профиля волнистости, R_z – высоты неровностей профиля по десяти точкам, S_m – среднего шага неровностей, (табл. 1):

а) при скоростном зубофрезеровании

$$R_{\max} = 5,0 \quad R_a ; \quad (1)$$

$$R_z = 4,0 \quad R_a ; \quad (2)$$

б) при зубофрезеровании фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава

$$R_{\max} = 6,0 \quad R_a ; \quad (3)$$

в) при зубофрезеровании червячными модульными фрезами ГОСТ9324-80

$$R_{\max} = 7,0 \quad R_a ; \quad (4)$$

$$R_z = 5,5 \quad R_a . \quad (5)$$

Параметр t_m , не приведенный в таблице из-за малого диапазона его изменения, следует принимать при скоростном зубофрезеровании, обеспечивающем эвольвентновершинную финишную обработку 60 – 70%; при зубофрезеровании фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава 40 – 50%; при зубофрезеровании червячными модульными фрезами ГОСТ9324-80 – 50%.

Данные таблицы позволяют установить технологические методы, которые обеспечивают получение требуемых параметров состояния контактирующих поверхностей цилиндрических зубчатых колес. Для определения конкретных условий обработки необходимо учитывать их функциональную связь с параметрами состояния обрабатываемых поверхностей.

Ниже приведены эмпирические зависимости для расчета параметров состояния эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес при механических методах их обработки.

Зубофрезерование фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава и минералокерамики после термообработки ТВЧ и спрерной закалки [3] (сталь 34ХНМ):

Таблица 1 – Технологические методы зубообработки при обеспечении системы параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических крупномодульных зубчатых колес

Метод обработки	Параметры состояния поверхностного слоя								Физико-механические свойства поверхностного слоя			
	Шероховатости					Волнистости						
	R_a мкм	R_z мкм	R_p мкм	S_m мм	S мм	W_z мкм	W_m мкм	S_{mw} мм	$k=H_{\mu 0}/H_{\mu}$ %	h_{μ} мм	σ_0 МПа	h_{σ} мм
Зубофрезерование	4,5	60	50,0	0,5	0,1	8,0	5,0	2,5	120	0,2	250	0,1
	2,5	40	16	0,3	60		16	10,0	180	—	—	0,2
	0,9	20	4,0	—	—	25,0	0,63	0,8-4,0	110—	0,5	300	0,08
Скоростное зубофрезерование	1,9	16,	10,0	1,2	1,2	12,5	8,0	2,5-	110—	0,15	300	0.01 5
	0,8	0	—	5	5-	—	40	12,0	180	—	—	—
	0,40		30	—	5,0	60,0	2,0-	0,8	100—	0,25	350	0,25
	0,20	50	2,5	5,0	0,3	3,0	12,5	8,0	150	0,08	200	0.10

$$R_a = 4830 \frac{S_z^{1.69} t^{0.15}}{V^{1.25} \rho^{0.14} Z_1^{0.24} Z_2^{0.28} (HRC)^{4.02} t^{0.32} K_{\text{фп}}^{1.24}} \frac{1}{k_m k_0}; \quad (6)$$

$$R_p = 8730 \frac{S_z^{1.15}}{V^{1.27} \rho^{0.24} Z_1^{0.14} Z_2^{0.17} (HRC)^{2.82} t^{0.26} K_{\text{фп}}^{1.24}} \frac{1}{k_m k_0}; \quad (7)$$

$$W_z = 5500 \frac{S_z^{1.01} t^{0.46} \rho^{0.16} \gamma^{0.54}}{V^{1.52} \rho^{0.24} Z_1^{0.14} Z_2^{0.17} (HRC)^{2.82} K_{\text{фп}}^{1.24}}; \quad (8)$$

$$S_m = 17 \cdot 10^3 \frac{(HRC)^{1.58}}{\rho^{0.24} Z_1^{0.07} Z_2^{0.11} V^{2.04}} \frac{k_0}{k_m}; \quad (9)$$

где S_z – подача на зуб (0,06 – 0,5 мм); S_0 – подача на оборот (0,1 – 0,5 мм/об); V – скорость резания при фрезеровании (0,6... 5 м/с); t – глубина резания (0,3... 2,5 мм); ρ – радиус округления режущей кромки ($\rho = 0,05$ – 0,8 мм); γ – передний угол фрезы; HRC – твердость обрабатываемого зубчатого колеса (HRC 30... 60); Z_1 и Z_2 – число зубьев нарезаемого зубчатого колеса и число режущих кромок зубьев фрезы, k_m – коэффициент, зависящий от марки обрабатываемого материала; k_0 – коэффициент, зависящий от способа формообразования эвольвентных поверхностей цилиндрического зубчатого колеса.

Значения коэффициентов k_m , k_0 приведены в табл. 2. Значения некоторых параметров шероховатости при скоростном зубофрезеровании фрезами, оснащенными режущими пластинками из твердого сплава и минералокерамики при зубофрезеровании зубчатых колес из сталей 38ХМЮА и 34ХНМ на оп-

тимальных режимах ($V=285$ м/мин – скорость резания при зубофрезеровании, $S_0 = 0,5$ мм/об – подача на оборот) приведены в табл. 2.

В зависимости от условий скоростного зубофрезерования наибольшая волнистость может наблюдаться в поперечном или продольном направлении. При расчетах необходимо принимать наибольшее значение волнистости.

Результаты экспериментальных исследований показали, что наряду с режимами и геометрией инструмента значительное влияние на шероховатость поверхности оказывает жесткость оборудования, на котором обрабатывается зубчатое колесо.

Так, при зубофрезеровании зубчатого колеса из стали 40Х получены следующие уравнения с учетом статической жесткости оборудования j_{cm}

Таблица 2 – Значения коэффициентов в уравнениях 6, 7, 8, 9 [4]

Марка стали	Коэффициент				
	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4
Сталь 45	7,0	0,65	0,60	0,50	1,9
Сталь 40Х	21,5	0,75	0,55	1,38	0,25
Сталь 34ХНМ	12,0	0,85	0,65	0,36	0,15
Сталь 38ХМЮА	16,8	1,1	0,68	0,15	0,16

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \rho^{k_4} \cdot (50 + \gamma)^{k_5} \cdot \alpha^{k_6} \cdot j_{\text{н\ddot{o}}}^{k_7} \quad (10)$$

При скоростном чистовом зубофрезеровании (из стали 40X, HRC 30 – 35):

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \rho^{k_4} \cdot n^{k_5} \cdot (HRC)^{k_6} \cdot j_{\text{н\ddot{o}}}^{k_7}, \quad (11)$$

где V – скорость резания; ρ – радиус округления режущей кромки ($\rho=0,05 - 0,8\text{мм}$); n – число проходов; HRC – твердость обрабатываемого зубчатого колеса; j_{cm} – статическая жесткость станка (9,8 – 29,4 МН/м).

При скоростном зубофрезеровании фрезами

$$R_a = k_0 \cdot \frac{R_{a,\text{эп\ddot{o}}}^{k_1} \cdot S_{\text{н\ddot{o}}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}}, \quad (12)$$

$$R_p = k_0 \cdot \frac{R_{p,\text{эп\ddot{o}}}^{k_1} \cdot S_{\text{н\ddot{o}}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}}, \quad (13)$$

$$W_z = k_0 \cdot \frac{W_{z,\text{эп\ddot{o}}}^{k_1} \cdot S_{\text{н\ddot{o}}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}}, \quad (14)$$

$$W_p = k_0 \cdot \frac{W_{p,\text{эп\ddot{o}}}^{k_1} \cdot S_{\text{н\ddot{o}}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}}, \quad (15)$$

$$H_{\mu 0} = 10 \cdot k_0 \cdot \frac{p^{k_2} \cdot n^{k_4}}{R_{a,\text{исх}}^{k_1} \cdot S_{np}^{k_3} \cdot V^{k_5}}, \quad (16)$$

где S_{np} – продольная подача (130 – 420мм/мин); ρ – радиус округления режущей кромки фрезы ($\rho = 0,05 - 0,8\text{ мм}$); n – число проходов (1 – 3); V – скорость резания (3... 4,5 м/с).

Значения коэффициентов $k_0 - k_5$ приведены в табл. 3.

При скоростном зубофрезеровании фрезами параметры шероховатости можно определить

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \rho^{k_4} \cdot n^{k_5} \cdot (HRC)^{k_6} \cdot j_{\text{н\ddot{o}}}^{k_7},$$

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \gamma^{k_4} \cdot r_p^{k_6} \cdot P^{k_6} \cdot D^{k_7} \cdot S_{\text{Д}}^{k_8} \cdot v_{\text{Д}}^{k_9}, \quad (17)$$

где V и S – соответственно скорость резания и подача ($V = 3,00 - 4,05\text{ м/с}$) ($S = 7,00 - 8,00\text{ мм/об}$).

Характеристики шероховатости при скоростном зубофрезеровании фрезами зубчатых колес определяются из следующих уравнений с радиусом округления режущей кромки фрезы ($\rho < 0,05\text{ мм}$):

$$R_a = 0.006\rho^{1.03} P^{-0.4}V^{0.37} S^{0.35} \text{ мкм}, \quad (18)$$

$$R_p = 0.026\rho^{0.96} P^{-0.34}V^{0.26} S^{0.61}, \quad (19)$$

при скоростном зубофрезеровании фрезами крупногабаритных зубчатых колес с радиусом округления режущей кромки фрезы ($\rho \geq 0,05\text{ мм}$)

$$R_a = 0.18\rho^{1.22} I^{-0.03} P^{-0.41}V^{0.36} S^{0.29}, \quad (20)$$

$$R_p = 0.21\rho^{0.96} I^{-0.03} P^{-0.37}V^{0.35} S^{0.3}, \quad (21)$$

Последовательность формирования поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес регламентируется исходными технологическими параметрами.

Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя зубчатых колес устанавливает оптимальные условия зубофрезерования, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска при зубофрезеровании всех зубьев фрезы (табл. 4).

Таблица 3 – Значение коэффициентов $k_0 - k_5$ для характеристик качества поверхностей цилиндрических крупномодульных зубчатых колес

Характеристика поверхностного слоя	Исследуемый материал	Коэффициенты					
		k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
R_a	45 (220HB)	3.4	0.986	0.896	0,202	0,023	-0,004
	40X (HRC 30)	8.0	0,765	0,651	0,103	0,206	0,090
	34XHM (HRC 48)	12,1	0,796	0,752	0,028	0,034	0,019
R_p	45 (220HB)	3.1	0,927	0,969	0,257	0,027	-0,017
	40X (HRC 30)	17.4	0,640	0,809	0,103	0,206	0,090
	34XHM (HRC 48)	17,8	0,772	0,890	0,064	0,071	0,026
W_a	45 (220HB)	0.07	0,112	0,427	0,063	-0,076	-0,066
	40X (HRC 30)	51,6	1,037	1,123	0,087	0,134	0,058
	34XHM (HRC 48)	6,4	0,907	0,538	0,014	0,016	
W_p	45 (220HB)	0,1	0,086	0,727	-0,009	0,017	-0,006
	40X (HRC 30)	114,2	1,125	1,369	0,106	0,208	0,087
	34XHM (HRC 48)	5,9	0,940	0,492	0,015	0,022	
$H_{\mu 0}$	45 (220HB)	102,3	+0,042	0,312	0,024	0,013	0,018
	40X (HRC 30)	120,6	+0,033	0,266	0,014	0,025	-0,013
	34XHM (HRC 48)	236,0	+0,008	0,180	0,038	0,008	0,005

Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки распространяется для зубофрезерования цилиндрических, обычной твердости 220...320 HB и закаленных HRC 46...63 зубчатых колес.

Регламент устанавливает геометрические параметры червячных модульных и специальных скоростных немодульных дисковых фрез во взаимосвязи с технологическими режимами резания и параметрами поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес.

Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании гарантирует:

1. Обеспечение высокой производительности при максимальной стойкости инструмента;

2. Технологическое обеспечение параметров поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при максимальной обрабатываемости;

3. Высокую технологическую стабильность зубообрабатывающего оборудования, дорогостоящего инструмента при обработке цилиндрических зубчатых колес.

Научные основы технологического регламента выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании базируются на основополагающих теоретических положениях теории о трении, технологии машиностроения и теории резания.

Процесс встречного зубофрезерования при врезании первого зуба фрезы сопровождается скольжением, температура в зоне резания резко возрастает,

что является одной из причин повышенного износа фрез по задним поверхностям и возникновению силового поля генерируемого передней поверхностью фрезы. По достижении определенной толщины слоя a_f на угле скольжения $\psi_{ск}$ процесс пластической деформации переходит в резание [5].

В процессе снятия стружки деформация слоев обрабатываемого материала возникает не только в области плоскости скалывания стружки, но и впереди зуба фрезы и под плоскостью резания.

Металл, подминаемый режущим лезвием, в стружку не переходит. Деформированный слой после прохождения режущего лезвия определяет глубину наклепа ($h_{упр}$).

Трение поверхностных слоев трущихся материалов имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Трение обусловлено объемным деформированием материала и преодолением межмолекулярных связей, возникающих между сближенными участками трущихся поверхностей.

Трансформация напряженно-деформированного состояния зоны стружкообразования, остаточные напряжения, возникающие в образующемся поверхностном слое цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес, и упрочнением поверхностного слоя при увеличении радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы ρ , мм от 0,08 мм до 0,450 мм устанавливают пути воздействия внешних параметров, взаимосвязи между внутренними факторами, что в совокупности определяет

Таблица 4 – Значения коэффициентов при различных методах зубообработки в обеспечении системы параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес

Обрабатываемый материал	Исследуемый материал	Коэффициенты				
		k_0	k_1	k_2	k_3	k_4
45 (220HB)	R_a	139,4	-0,18	0,3	0,5	-0,28
	v	7,6	20,20	-0,28	0,32	-0,51
	b	0,02	0,24	-0,08	1,13	0,19
40X (HRC 30)	R_a	228,6	-0,11	0,47	-0,78	-0,22
	v	0,4	-0,07	-0,12	0,31	-0,3
	b	0,04	0,16	-0,08	0,12	0,12
34XHM (HRC 48)	R_a	287,0	0	0,5	-0,75	-0,38
	v	0,21	-0,08	-0,11	0,30	-0,11
	b	0,08	0,06	-0,11	0,11	0,17
Обрабатываемый материал	Исследуемый материал	Коэффициенты				
		k_5	k_6	k_7	k_8	k_9
45 (220HB)	R_a	-0,18	-1,15	0,97	0,33	0
	v	-0,58	-0,44	0,46	0,6	0,40
	b	0	0,46	-0,42	-0,19	-0,06
40X (HRC 30)	R_a	-0,26	-1,15	0,86	0,27	0
	v	0,27	-0,29	0,66	0,02	0,2?
	b	0	0,58	-0,62	-0,11	-0,04
34XHM (HRC 48)	R_a	-0,21	-1,27	1,05	0,39	0
	v	0,75	-0,33	0,77	0,07	0,23
	b	0	-0,61	-0,72	-0,16	-0,06

напряжения и деформации в зоне формообразования и в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента и трения по задней поверхности инструмента, размеры площади полного и пластического контакта, форму, размеры и ориентацию зоны стружкообразования с учетом интегральных параметров угла скольжения $\Psi_{ск}$, соответствующего пластическому оттеснению (передеформированию) материала, когда материал обтекает инструмент без отделения от основной массы, коэффициент формообразования поверхностного слоя, средний коэффициент трения, работа и силы резания.

Как показали исследования, распространение напряжений, возникающих под воздействием радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы ρ , за линию среза представляет определяющий фактор в формировании поверхностного слоя изделия, а технологические процессы формирования поверхностного слоя представляют комплексную систему. Такое положение обусловлено влиянием распределения контактных нагрузок на задних поверхностях инструмента (рис. 1) на качество поверхностного слоя цилиндрических закаленных зубчатых колес за счет температурного фактора непосредственного изменяющего свойства поверхностного слоя и силового поля, порождаемого задней поверхностью инструмента в зависимости от радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы ρ .

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 (рис. 2). Соотношение между углом скольжения $\Psi_{ск}$ и наибольшим углом контакта зуба фрезы Ψ_{max} с обрабатываемой поверхностью позволяет установить эффективность процесса формообразования через коэффициент эффективности функционального формирования поверхностного слоя K_p [6].

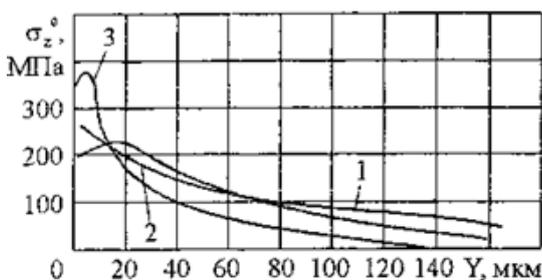


Рис. 1 – Эпюры остаточных напряжений, полученные при скоростном зубофрезеровании стали 34ХНМ: припуск на сторону $t = 0,8$ мм; $S_{мин} = 140$ мм/мин; $v = 3,00$ м/с: 1 –

$$\rho = 0,08 \text{ мм}; 2 - \rho = 0,140 \text{ мм}; 3 - \rho = 0,400 \text{ м/м}$$

Изменение толщины срезаемого слоя при достижении минимального угла скольжения $\Psi_{скмин}$ изменяет коэффициент трения при наличии обязательного всплеска (скачка), что неблагоприятно сказывается на динамику резания и качество обработанной поверхности и определяется коэффициентом трения, зависящим от молекулярно-атомной шероховатости обрабатываемой поверхности и инструмента.

$$\text{Угловой шаг зубьев фрезы } \varpi = \frac{360^\circ}{Z} \quad (22)$$

Максимальный угол контакта зуба фрезы с обрабатываемым зубчатым колесом (максимальный угол скольжения) Ψ_{max}

$$\sin \Psi_{max} = \frac{H_i}{R_{\delta\delta}} = \frac{2 \cdot H_i}{d_{\delta\delta}} = \frac{\sqrt{t \cdot (d_{\delta\delta} - t)}}{d_{\delta\delta}}, \quad (23)$$

$$\Psi_{max} = \arcsin \frac{H_i}{R_{\delta\delta}} = \arcsin \frac{2 \cdot H_i}{d_{\delta\delta}} = \arcsin \frac{2 \cdot \sqrt{t \cdot (d_{\delta\delta} - t)}}{d_{\delta\delta}}, \quad (24)$$

где $t = 2,25m$ – высота зуба зубчатого колеса.

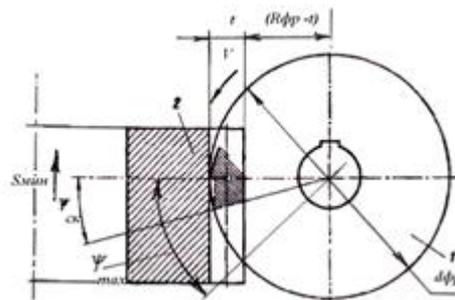


Рис. 2 – Схема расчета параметров обработки при зубофрезеровании зубчатых колес

К заключению об ограниченном участии силового поля, создаваемого задней поверхностью фрезы в формировании поверхностного слоя привели опыты с варьированием радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы ρ .

Только при увеличении радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы ρ отмечается рост остаточных напряжений, т.е. при

$$\rho \geq a_i / K_{сож},$$

при

$$\rho \leq a_i / K_{сож}$$

процесс пластической деформации переходит в резание (Табл. 5).

Рассмотрены технологические условия обеспечения показателей качества поверхностного слоя от угла скольжения при обработке закаленных колес [5, 6].

В настоящее время проводятся работы, направленные на разработку и освоение новых специальных технологий зубообработки закаленных зубчатых колес. Технологический процесс зубообработки зубчатых колес должен обеспечить геометрическую точность и качество поверхностного слоя зубьев колес. В то же время геометрическая точность зубчатых колес характеризуется точностью относительного движения при формировании эвольвентного профиля зубьев,

точністю относительных движений производящих режущих кромок инструмента относительно обрабатываемого зубчатого изделия и шероховатостью исполнительных и образующихся поверхностей.

Таблица 5 - Последовательность моделирования формирования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho=0,08; 0,10; 0,12\text{мм}$

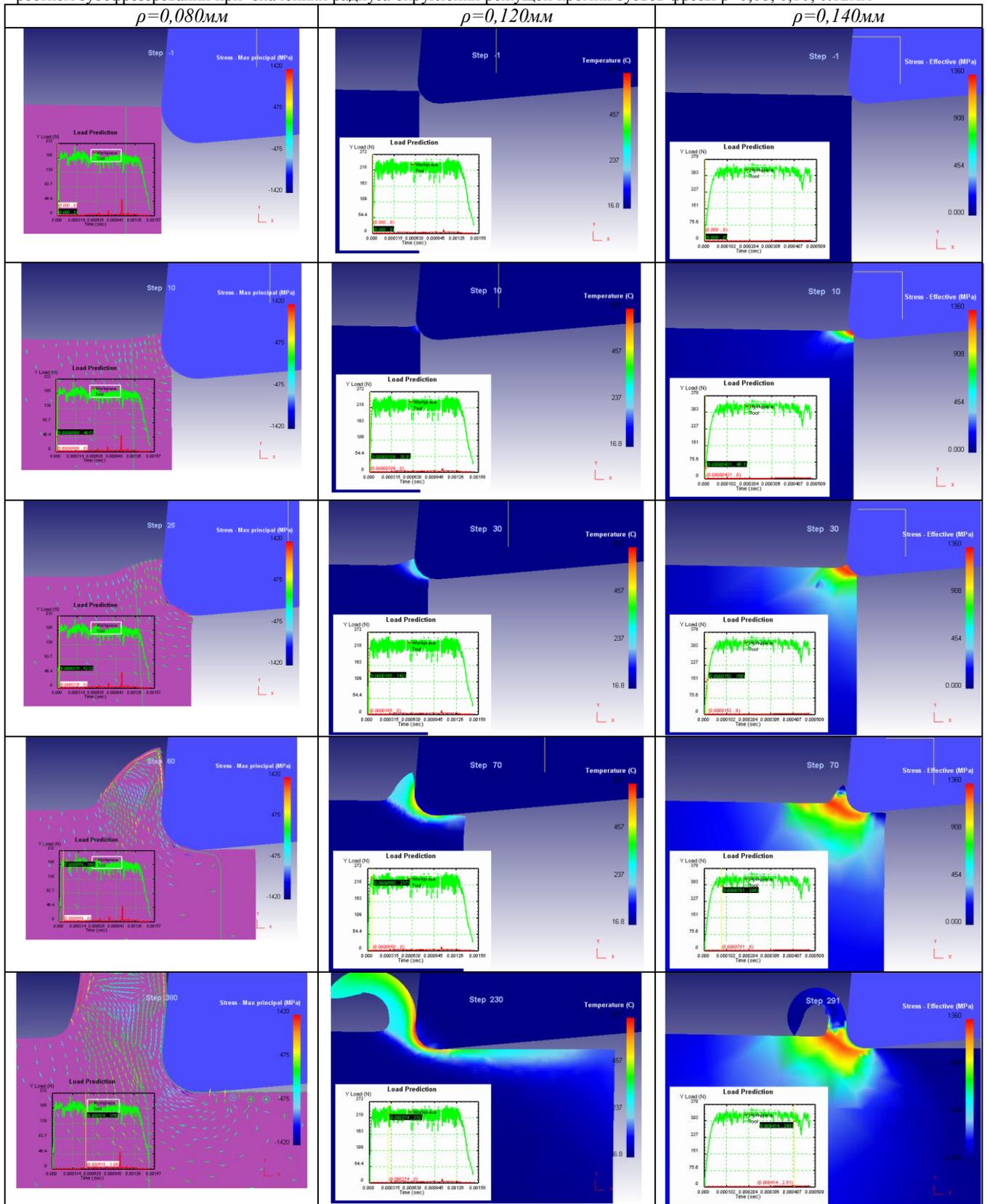
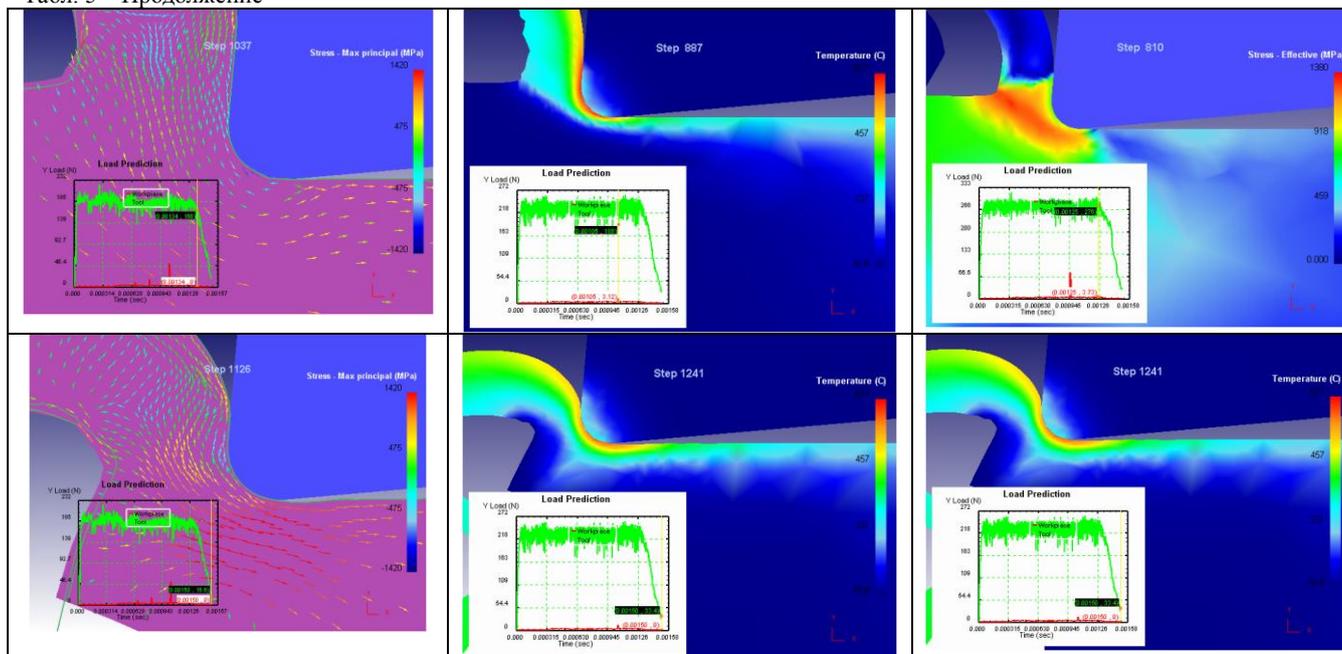


Табл. 5 – Продовження



Другим важным показателем качества обработки зубчатого колеса, обеспечивающим соответствие служебному назначению, достижение которого связано с значительными затратами при выполнении предварительной и окончательной обработки, является обеспечение качества поверхностного слоя, которое заключается в достижении требуемого качества как самого поверхностного слоя, так и прилегающего к поверхности слоя материала.

Последовательность моделирования формирования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho=0,160; 0,180; 0,300$ мм приведена в табл. 6.

Зубчатые колеса работают в условиях высокого контактного воздействия, воспринимают большие знакопеременные и реверсивные нагрузки. Поверхностный слой зубьев зубчатых колес характеризуется макроотклонениями, волнистостью, шероховатостью, субшероховатостью, адсорбированной зоной, зоной оксидов, граничной зоной материала, зоны материала с измененными физико-химическими свойствами.

Использование разработанного технологического регламента по выбору и назначению параметров обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя зубчатых колес устанавливает оптимальные условия резания, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска всех зубьев фрезы.

Последовательность моделирования формирования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho=0,350; 0,400; 0,450$ мм приведена в табл. 7.

Определение минимальных углов скольжения при обработке зубчатых колес методом фрезерования, исходя из физико-химических процессов механики трения, позволяет значительно повысить эффективность процесса формирования зубьев и эксплуатац

онные свойства их поверхностей [1, 3, 5].

Между остаточным напряженным состоянием поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес и напряженно-деформированным состоянием в зоне формообразования устанавливается весьма простая зависимость. С допущением полагая в зоне стружкообразования деформацию плоской, имеем

$$e_y = e_2 \cdot \cos 2\omega,$$

где e_2 - вторая главная деформация; e_z - деформация в направлении вектора скорости резания; ω - угол между направлениями e_2 и e_z .

Поскольку при резании деформация e_2 величина отрицательная, то при угле наклона ее траектории (линии трещины) меньше 45° деформация в тангенциальном направлении e_z будет сжимающей, а остаточные напряжения в этом направлении соответственно растягивающими.

Известно, что при начальном врезании зуба фрезы в поверхностном слое появляется текстура (рис. 3), направление которой совпадает с главной осью деформации растяжения. Если учесть, что в непосредственной близости от режущей кромки это направление сохраняется и в поверхностном слое, то знак остаточных напряжений будет связан и с углом текстуры Φ_2 , так как $\omega = 90^\circ - \Phi_2$. Отсюда вытекает, что при $\Phi_2 < 45^\circ$ следует ожидать остаточные напряжения сжатия (рис. 3), а при $\Phi_2 > 45^\circ$ - остаточные напряжения растяжения (рис. 4).

В результате по этим направлениям наряду с нормальными компонентами появляется и касательная. Касательные остаточные напряжения, как и нормальные (тангенциальные и осевые) могут быть и положительными, так и отрицательными (табл. 8), а их величина, естественно, тем больше, чем больше угол отклонения главных осей от направления формообразующих движений на угле скольжения зуба фрезы $\Psi_{ск}$.

Таблиця 6 - Последовательность моделирования формообразования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho=0,160; 0,180; 0,300\text{мм}$

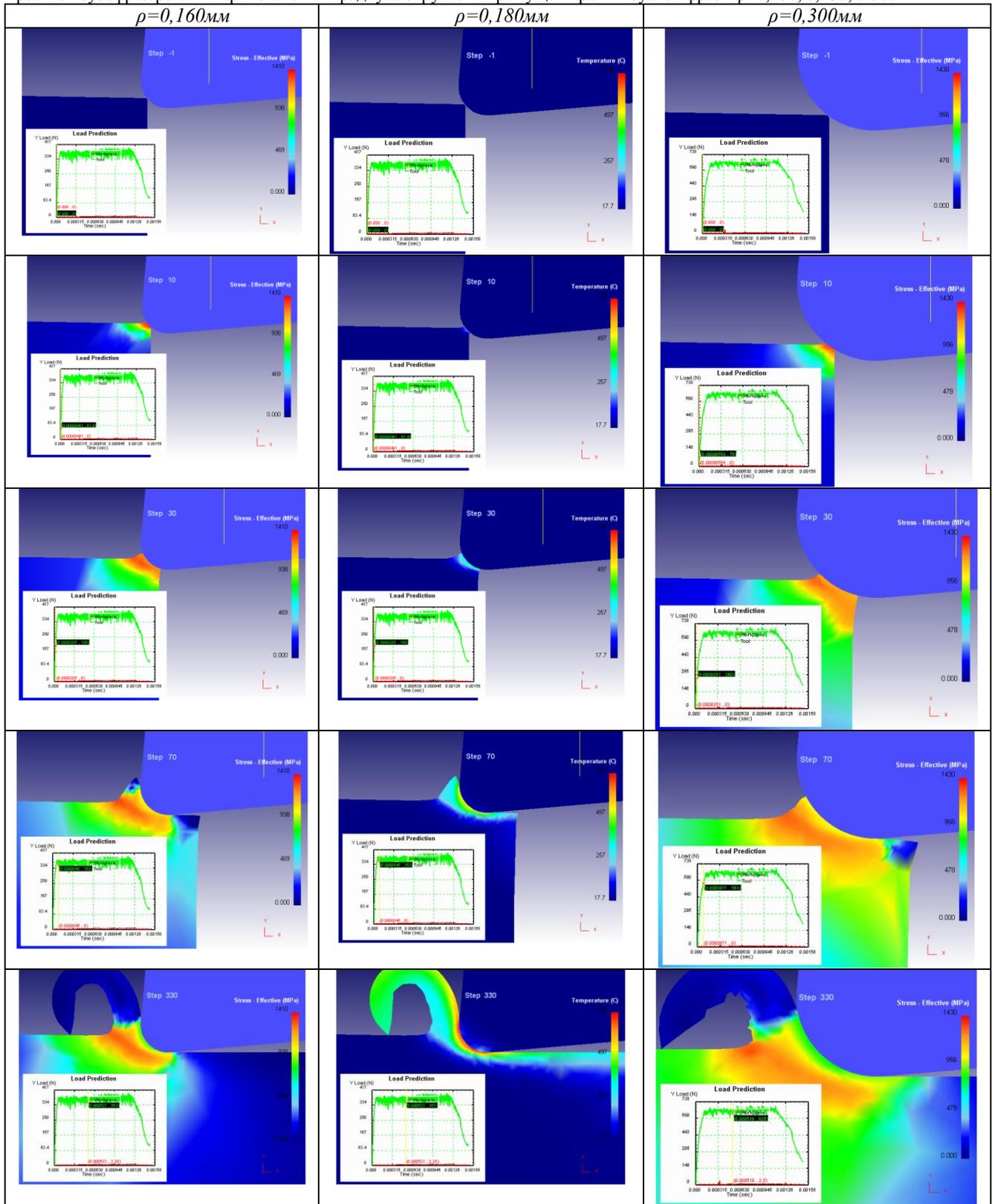
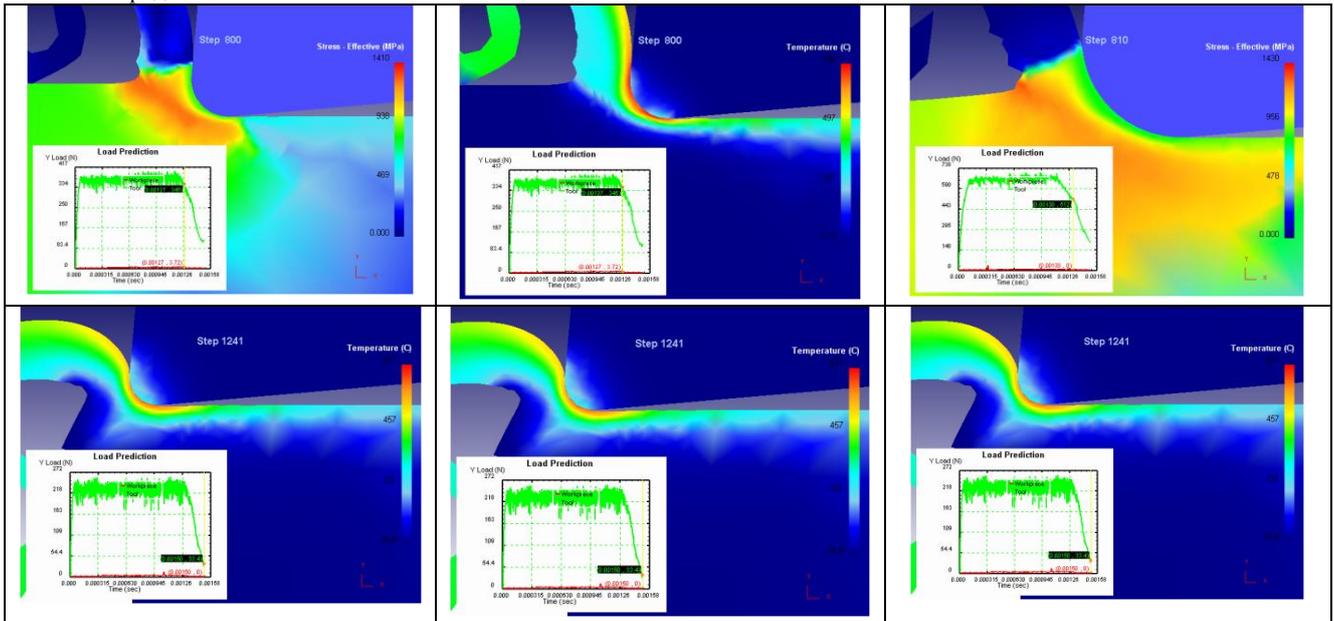


Табл.6 – Продолжені



Таблиця 7 - Последовательность моделирования формообразования остаточных напряжений поверхностного слоя при скоростном зубофрезеровании при значениях радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы $\rho=0,350; 0,400; 0,450\text{мм}$

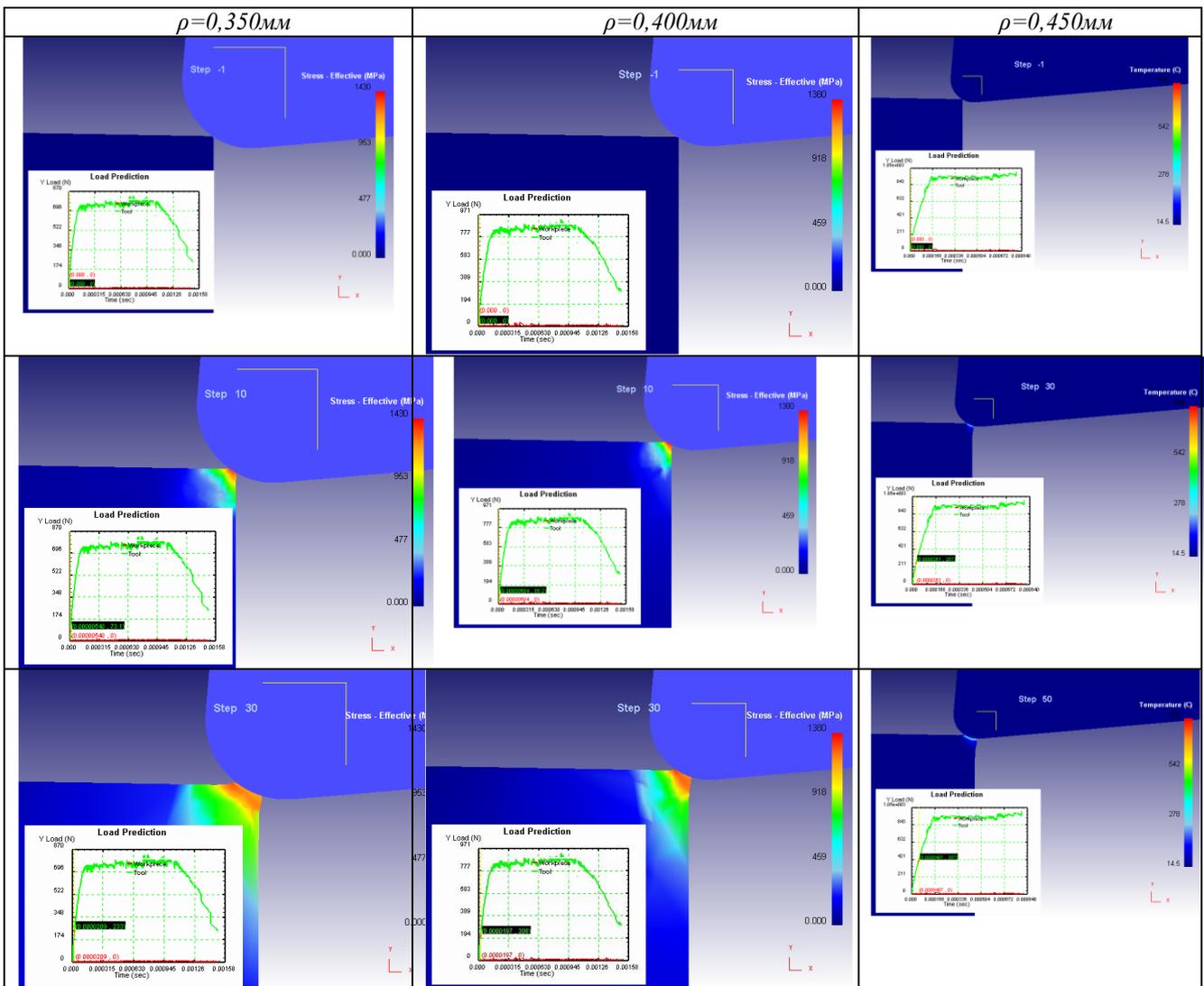


Табл.7 – Продолжени

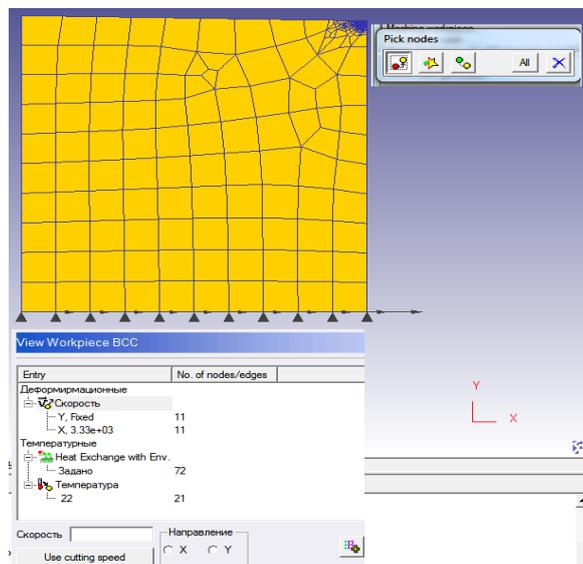
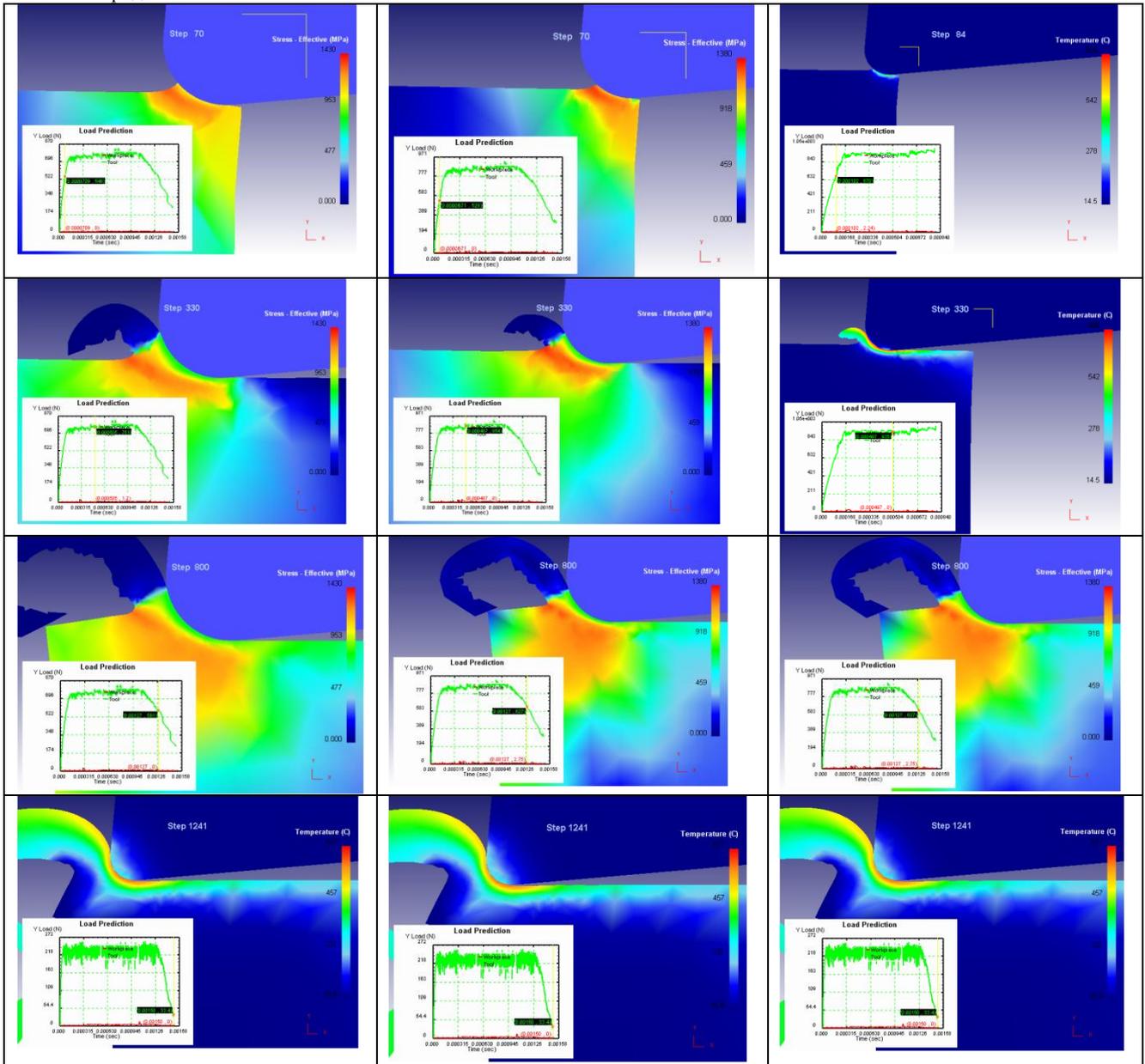
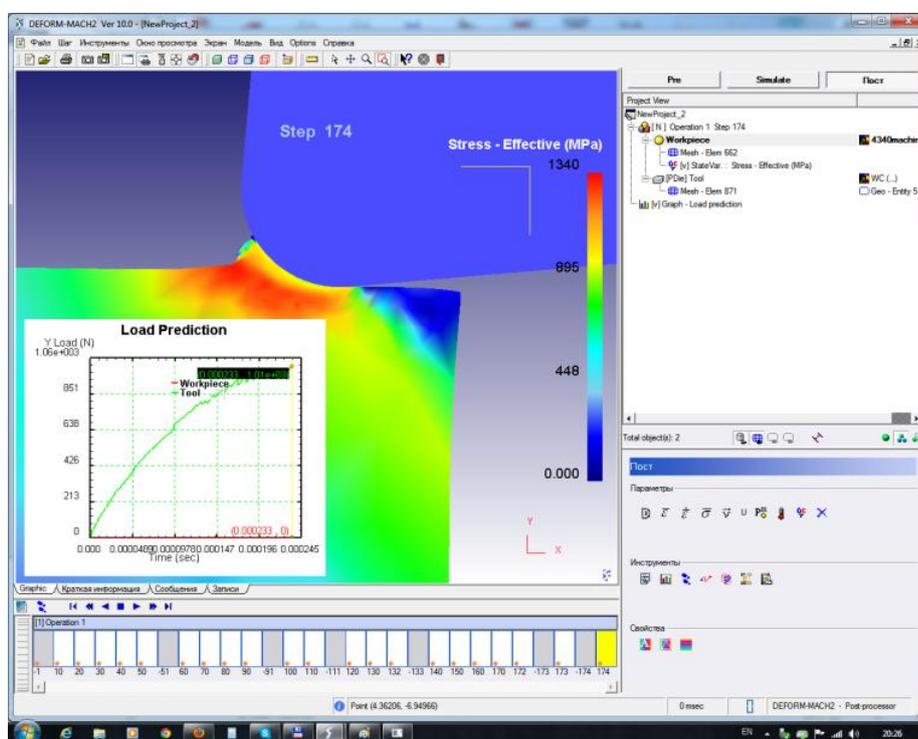


Рис. 3 – Остаточные напряжения сжатия при начальном врезании зуба фрезы

Таблица 8 - Знаки тангенциальных остаточных напряжений, определенные по углу текстуры стружки и экспериментально при скоростном зубофрезеровании стали 34ХНМ

Скорость резания, м/с	Наибольшая толщина среза а, мм	Радиус округления режущей кромки зубьев фрезы	Угол текстуры ЛЧ® W	Знак остаточных напряжений	
				по текстуре	эксперим,
0,2	0,73	0,08	54	+	+
	0,44	0,12	48	+	+
	0,6	0,14	57	+	+
	0,15	0,16	51	+	+
1,0	0,31	0,14	51	+	+
	0,36	0,16	58	+	+
2,0	0,27	0,16	66	+	+
	0,23	0,18	56	+	+
	0,24	0,30	48	+	+
3,0	0,34	0,35	61	+	+
	0,32	0,40	52	+	+
	0,12	0,45	49	+	+

Рис. 4 – Остаточные напряжения при начальном врезании зуба фрезы на угле скольжения $\Psi_{ск}$

Примечательно, что, как установлено экспериментально, на угле скольжения зуба фрезы при врезании образуются значительные растягивающие напряжения в поверхностном слое отклонения и по мере увеличения угла скольжения при переходе упругих деформаций в пластические-уменьшаются.

Непосредственная связь между напряжениями, возникающими в зоне стружкообразования, и остаточными напряжениями может быть показана при их представлении интенсивностью напряжений, характеризующей напряженное состояние в обобщенном виде. Эта связь выражается более четко, если остаточные напряжения оценивать площадью активной части

их эпюр. Происходит сглаживание погрешностей определения остаточных напряжений, присутствие которых неизбежно из-за сложности эксперимента.

Выводы 1. Основным фактором, определяющим характер остаточного напряженного состояния поверхностного слоя изделия, является поле напряжений, создаваемое передней поверхностью инструмента с учетом радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы ρ .

2. Ориентация траекторий главных деформаций, идущих от зоны стружкообразования за линию среза, определяет знак образующихся остаточных напряжений, а интенсивность напряжений в зоне стружкооб-

разования - интенсивность остаточных напряжений и степень упрочнения поверхностного слоя. Тем самым обуславливается взаимосвязь между остаточными напряжениями и показателями упрочнения.

3. При зубофрезеровании главные оси поля остаточных напряжений не совпадают с направлениями формообразующих движений, что требует характеризовать остаточное напряженное состояние или двумя нормальными компонентами, ориентированными по направлениям формообразующих движений, и касательной компонентой, или двумя главными компонентами и углом их отклонения от направлений формообразующих движений.

4. Экспериментальные исследования показали довольно тесную корреляционную связь между собой высотных параметров шероховатости R_a , H_p – высоты сглаживания макроотклонения, W_p – высоты сглаживания профиля волнистости, R_z – высоты неровностей профиля по десяти точкам, S_m – среднего шага неровностей. Моделирование последовательности формирования поверхностного слоя цилиндрических закаленных зубчатых колес регламентируется исходными технологическими параметрами.

5. Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя зубчатых колес устанавливает оптимальные условия зубофрезерования, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска при зубофрезеровании всех зубьев фрезы. Технологический регламент выбора и назначения параметров зубообработки разработан на научной основе технологического обеспечения параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических, закаленных зубчатых колес.

6. Технологический регламент выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании гарантирует:

- обеспечение высокой производительности при максимальной стойкости инструмента;
- технологическое обеспечение параметров поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при максимальной обрабатываемости;
- высокую технологическую стабильность зубообрабатывающего оборудования, дорогостоящего инструмента при обработке цилиндрических зубчатых колес.

Список литературы

Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск: ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3.
 Клочко А. А. Технологические основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / А. А. Клочко, А. Н. Кравцов; Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.: ил., табл.; -

(Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). ISBN 978-5-906703-02-6.

Литвинов В.М. Технологические особенности спрейерной закалки крупногабаритных зубчатых колес в тяжелом машиностроении / В.М. Литвинов, Е.В. Мироненко, А.Н. Шелковой, М.И. Гасанов, А.А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – Вып. 38. – С. 51–59.

Суслов А. Г. Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин [Текст] / А. Г. Суслов; Под ред. И. М. Корсаковой // – М.: Издательство МГИУ, 2010. – с. 111.

Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 1: учеб. пособие / А.В. Беловол, А.А. Клочко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин, А.Н. Шелковой. под редакцией А.Н. Шелкового // □ X.: НТУ «ХПИ», 2016. □ 400 с. □ На русском языке. ISBN 978-966-593-749-4.

Логіко-лінгвістичне моделювання взаємозв'язку функціональних характеристик системи дрібносерійного виробництва з параметрами процесу складання / О.М. Шелковий, О.О. Клочко, Л.Б. Шрон, А.О. Скоркін, О.Л. Кондратюк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2015. – Вып.67. – С. 94-100.

Добротворський С. С. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей / С. С. Добротворський, Є. В. Басова та ін. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: збірник наукових праць. – 2015. – № 822. – С. 7–13.

References (transliterated)

1. Kluchko A.A. [et al.]. Technological bases of coarse-grained gear treatment hardened gears: monograph / - Kramatorsk: DGMA, 2014. - 479 p. ISBN 978-966-379-667-3.
2. Kluchko A.A., Kravtsov A.N. technological foundations for coarse-grained gear treatment process hardened gears [text]; Donbass State Engineering Academy; Closed Joint-Stock in the "ONYX" - Kramatorsk: DGMA; Irbit: ONYX, 2014 - 299 p.: silt.; Table. - (.. Series: "The design and application of cutting tools in the engineering industry" / Com Ed YM Solomentsev). ISBN 978-5-906703-02-6.
3. Litvinov, V.M., Mironenko E.V., Shelkova A.N., Gasanov M.I., Kluchko A.A. Technological features spreyonny hardening of large gears in heavy engineering. The reliability of the instrument and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2016. - Vol. 38. - pp. 51-59.
4. Suslov A.G. Assigning, marking and control of roughness surfaces of machine parts [Text] - M.: Publisher MGIU, 2010. - p. 111.
5. Belovol A.V., Kluchko A.A., Naboka E.V., Skorkin A.O., Shelkova A.N. Simulation modeling in problems of machine-building production in 2 volumes, Volume 1: studies. allowance. Kharkov.: NTU «KPI», 2016. 400p. In Russian. ISBN 978-966-593-749-4.
6. Shelkova A.N., Kluchko A.A., Shron L.B., Skorkin A.O., Kondratyuk O.L. Logiko-lingvistichne modelyuvannya vzaimozv'yazku funktsionalnih system characteristics dribnoseriynogo vrobntstva s parameters skladannya processes. Public information and computer integrated technologies: Sat. scientific. tr. - Kharkov/ Nat. aerokosm. Univ "HAI", 2015. - Vyp.67. - pp. 94-100.
7. Dobrotvorsky S.S., Basova E.V., ets. Komp'yuterne proektuvannya ta modelyuvannya tehnologichny'x procesiv vy' sokoshvy'dkiskogo frezeruvannya zagartovany'x [Computer design and simulation processes high-speed milling hardened steels] Visnyk Nacional'nogo universy'tetu «Lviv'ska politexnika». Seriya: Opty'mizaciya vy'robny'chy'x procesiv i technichny'j kontrol' u mashynobuduvanni ta pry'-ladobuduvanni : zbirnyk naukovy'x prac'. 2015. No 822. pp. 7–13.

Поступила (received) 12.10.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Технологічний регламент вибору і призначення параметрів стану поверхневого шару загартованих зубчастих коліс / О. О. Клочко, М. І. Гасанов, Є.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.

Технологический регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес / А. А. Клочко, М. И. Гасанов, Е.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X

Production schedules the selection and appointment of the surface layer state parameters of hardened gears / A.A. Klochko, M. I. Hasanov, E.V. Basova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – P.112–116. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клочко Олександр Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: klochko21@rambler.ru .

Клочко Александр Александрович – доктор технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический университет», г. Харьков; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: klochko21@rambler.ru .

Klochko Alexander Alexandrovich - Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politechnichemkty University" Kharkiv; tel .: (057) 707-66-25; e mail: klochko21@rambler.ru.

Гасанов Магамед Иса – проректор, канд. технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (057) 707-66-25;

Гасанов Магамед Иса – проректор, канд. технических наук, профессор, кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический университет», г. Харьков; (057) 707-66-25;

Hasanov Mahammad Isa - Candidate of Technical Sciences, Full Professor, Department of Mechanical Engineering Technology and machine tools of the National Technical University "Kharkiv politechnichemkty University" Kharkiv; tel .: (057) 707-66-25;

Басова Євгенія Володимирівна – канд. технічних наук, доцент кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

Басова Евгения Владимировна – канд. технических наук, доцент кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический университет», г. Харьков; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivaschenko@mail.ru;

Basova Evgenia Vldimirovna- Candidate of Technical Sciences, Docent of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25; e-mail: evgeniya.ivaschenko@mail.ru.