

УДК 621.9.014: 621.833.1

С.И. Тахман, Л.В. Рохин, О.А. Тюкалов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРЯМОЗУБЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

Изменение сил резания при фрезеровании зубьев нарезаемых колёс червячными фрезами ставит задачу оценки технологических составляющих в двух системах координат – действующих на фрезу в целом (окружная, радиальная и осевая) и на нарезаемое колесо (крутящий момент, вертикальная сила и сила отжима). Каждая из этих составляющих меняется при движении зуба фрезы по углу контакта с заготовкой (по законам фрезерования) и при перемещении режущих выступов фрезы вдоль линии зацепления (по законам огибания). По первой закономерности зубья фрезы поочередно входят под стружку и проходят дугу контакта, увеличивая толщину срезаемого слоя по синусоидальному закону. По второй закономерности в каждой точке линии зацепления режущий выступ фрезы занимает свою угловую позицию относительно нарезаемой величины, что по-разному ориентирует технологические составляющие в каждой из систем координат.

Для совмещения подходов к оценке сил, действующих на фрезу и на колесо, физические составляющие сил на режущих кромках приходится прикладывать к линиям симметрии режущего выступа фрезы и впадины колеса, в которой этот выступ находится. Расчёт сил проводится на одном обороте фрезы в «установившемся» режиме обработки колеса (после полного врезания на глубину впадины при условии, что ширина зубчатого венца нарезаемого колеса

$$B > (1,5 \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{a1} \cdot m) - (2,25 \cdot m^2)}).$$

При зубофрезеровании червячными фрезами для оценки нагрузки на режущий инструмент, кроме главной составляющей силы резания необходимо знать и радиальную составляющую на фрезу, которая оказывает эффект её отжима от обрабатываемой заготовки. Для оценки сил резания, кроме механических свойств обрабатываемого материала, необходимо знать площадь срезаемого слоя, величину и расположение активных длин режущих кромок на зубьях фрезы в любой момент процесса резания. Для решения поставленных задач использована разработанная 3D модель процесса зубофрезерования [1], созданная в системе параметрического проектирования T-FLEX CAD.

Для принятых условий моделирования ( $z_1=14$ ,  $z_2=25$ ,  $m=4$  мм,  $S_{верт}=2,5$  мм/об.заг., обрабатываемый материал – 12ХН3А, зуб нормальной высоты, встречное фрезерование, винтовые стружечные канавки на однозаходной фрезу, передний угол  $\gamma=0^\circ$ ) определены площади среза и активные длины режущих кромок, полученные через каждые  $5^\circ$  за один оборот фрезы [2, 3].

Расчёт сил  $P_y$  проведён по методике [4].

Из источника [2]: при заданных геометрических параметрах зуба фрезы степень деформации стружки в единицах относительного сдвига  $\varepsilon=3,5$ ; усадка стружки при  $\gamma=0^\circ$   $\zeta=3,2$ ; предел текучести обрабатываемого материала  $\sigma_T=685$  Н/мм<sup>2</sup>; истинное напряжение образца при разрыве  $S_B=1032$  Н/мм<sup>2</sup>; касательное напряжение в условной плос-

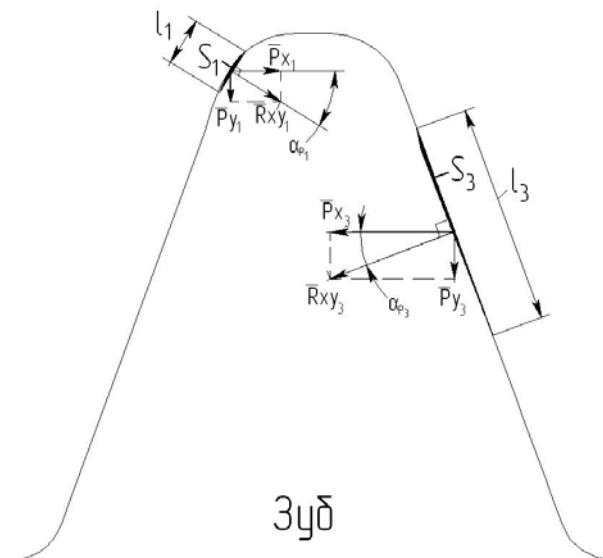


Рис. 1. Схема определения угла  $\alpha_{pk}$  в сечении зуба

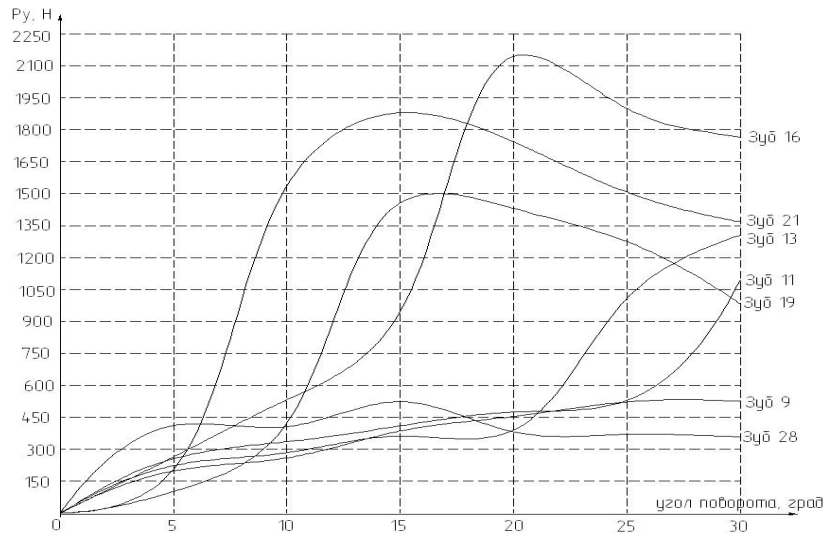


Рис. 2 Графики изменения силы  $P_y$  по углу контакта фрезы с заготовкой (номер зуба определяет угол его расположения во впадине за счёт движения обката)

кости сдвига  $\tau_p = 775 \text{ Н/мм}^2$ . В этих условиях удельная сила на передней поверхности инструмента вдоль скорости резания  $C_{mn}$  составляет 1938 МПа.

Для определения радиальной составляющей силы  $P_{Yk}$  необходимо знать угол  $\alpha_{pk}$  между равнодействующей сил в основной плоскости  $R_{XYk}$  и силой, действующей перпендикулярно оси симметрии зуба  $P_{Xk}$  для каждого элемента площади среза, который рассчитывается через координаты границ каждой активной длины участков кромок режущего зуба (рис. 1). На рисунке показан случай, при котором вершинный участок зуба в процессе резания не участвует, т.е.  $R_{XY2} = 0$ .

$$P_{Yk} = R_{XYk} \cdot \sin \alpha_{pk} \quad (1)$$

Равнодействующая сил  $P_x$  и  $P_y$  рассчитывается через удельные силы на передней и задней поверхностях по зависимости

$$R_{XYk} = U_{III} \cdot S_k + U_{3II} \cdot l_k \quad (2)$$

Удельная сила в направлении нормали к главной составляющей в основной плоскости на передней поверхности инструмента составляет

$$U_{III} = C_{III} \cdot \text{tg} \omega, \quad (3)$$

где  $\omega$  – угол действия равнодействующих сил на соответствующем участке.

По [5]: угол сдвига

$$\text{tg} \Phi_0 = \frac{\cos \gamma}{\zeta - \sin \gamma} = \frac{1}{\zeta} = \frac{1}{3,5} = 0,2857;$$

угол действия равнодействующей сил  $\omega$  на передней поверхности режущего выступа червячной фрезы

$$\text{tg} \omega = 1 - (1,1 - \text{tg} \Phi_0) = 1 - (1,1 - 0,2857) = 0,6564$$

Тогда удельная сила  $U_{mn}$  на передней поверхности инструмента в направлении, перпенди-

кулярном вектору скорости резания в основной плоскости, в зависимости (2) составляет

$$U_{III} = 1938 \cdot 0,6564 = 1272 \text{ МПа}$$

Удельная сила на задней поверхности инструмента в этом же направлении рассчитывается по уравнению

$$U_{3II} = 1,5 \cdot \tau_p \cdot \rho (3,17 \cdot \varepsilon + 1) \cdot \text{tg} \omega \cdot K_\rho + \sigma_T \cdot h_3, \quad (4)$$

где  $K_\rho$  – коэффициент, учитывающий изменение  $\varepsilon$  на малых толщинах.

$$\text{При } a_{\max} = S_z \cdot \sin \theta < a_0 = 1,74 \cdot \rho$$

$$K_\rho = \sqrt{\frac{a_{\max}}{a_0}},$$

где  $a_{\max}$  – толщина стружки на выходе с дуги контакта;

$a_0$  – граница изменения усадки стружки на тонких срезах;

$S_z = 0,007 \text{ мм./зуб.}$  – подача на зуб червячной фрезы;

$\theta = 32,86^\circ$  – угол контакта фрезы с заготовкой;

$\rho = 0,01 \text{ мм.}$  – рабочий радиус округления режущих кромок зубьев фрезы.

Тогда

$$K_\rho = \sqrt{\frac{0,0038}{0,0174}} = 0,467.$$

При  $h_3 = 0,3 \text{ мм.}$  – принятая по рекомендациям максимальная ширина площадки износа на задней поверхности инструмента  $U_{3II}$  составляет

$$U_{3II} = 1,5 \cdot 775 \cdot 0,01 \cdot (3,17 \cdot 3,5 + 1) \times \\ \times 0,6564 \cdot 0,467 + 685 \cdot 0,3 = 43 + 206 = 249 \text{ Н/мм}$$

Суммируя значения  $P_{yi}$  от каждой кромки зу-

ба находящегося под стружкой в данный момент времени получим суммарную величину радиальной составляющей силы действующей на каждый зуб червячной фрезы (при данном угле поворота). Радиальные составляющие на нарезаемом колесе из-за их проектирования на линию симметрии впадин приходится объединять в общую силу с учётом угловых шагов колеса.

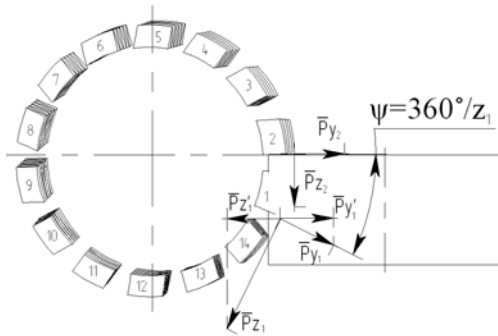


Рис. 3 Схема расположения сил  $P_z$  и  $P_y$  на фрезе ( $\psi$  – угловой шаг зубьев фрезы)

Изменения величины сил  $P_y$  по углу контакта зубьев фрезы с заготовкой для некоторых положений их во впадине нарезаемого колеса представлены на рис. 2. При этом нумерация зубьев после 14 продолжается на следующих витках.

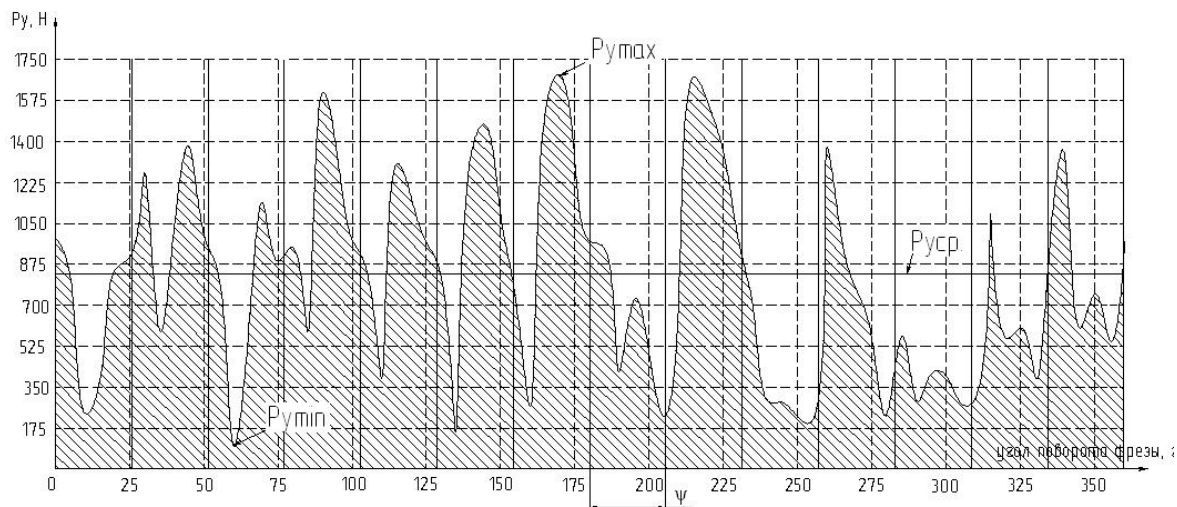


Рис. 4 График изменения суммарной силы отжима на одном обороте фрезы при формировании полной высоты зуба

Путём суммирования рассчитанных величин сил  $P_y$  на зубьях с учётом расположения каждого режущего выступа реек на своём уровне по углу контакта получены значения суммарных сил отжима для каждой из четырнадцати реек.

Значения сил  $P_z$  [2] и  $P_y$  на режущих выступах геометрически складываются с учётом направления их действия по мере поворота фрезы для оценки проекций этих сил на плоскость, перпендикулярную оси заготовки (рис. 3). Уравнение

мгновенной суммарной силы отжима, действующей на фрезу в данный момент времени, учитывает все зубья  $z_1$ , находящиеся под стружкой. Для схемы на рис. 3:

$$\sum P_y = P_{y2} + (P_{y1} \cdot \cos \psi) - (P_{z1} \cdot \sin \psi).$$

На рис. 4 показан характер изменения суммарной силы отжима на одном обороте фрезы в «установившемся» режиме обработки.

Расчёт средней силы отжима  $P_{уср}$  на фрезе проведён с использованием удельной работы каждого режущего выступа реек фрезы на дуге контакта с нарезаемым колесом (индекс  $i$  относится к номерам зубьев расположенных на дуге контакта)

$$P_{уср} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{i=1}^{z_1} P_{yqi} \cdot d\varphi. \quad (5)$$

Площадь под кривой силы  $P_y$ , представляющая собой числитель формулы (5), является подынтегральной. Полученная средняя величина силы  $P_{уср}$  показана штрихпунктирной линией (рис. 4).

Максимальные и минимальные значения берутся с графика на рис. 4.

Таким образом, с помощью разработанной схемы моделирования и с учётом геометрических

условий силового взаимодействия червячной фрезы и нарезаемого колеса можно определять мгновенные максимальные и минимальные значения, а также среднюю величину радиальной составляющей силы резания в процессе зубофрезерования при любых условиях обработки.

Максимальные значения можно использовать в качестве ограничителя при назначении режимов обработки или в системах оптимизации режимов резания при зубофрезеровании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тахман, С.И.* Создание 3D модели процесса зубофрезерования/ С.И. Тахман, Л.В. Рохин, О.А. Тюкалов //Вестник КГУ: серия «Технические науки». – Курган: Изд-во КГУ, 2010. – №1(17). – С.118–120.
2. *Тахман С.И.* Теоретический расчёт графика изменения главной составляющей силы резания при зубофрезеровании/ С.И. Тахман, Л.В. Рохин, О.А. Тюкалов//Современные проблемы машиностроения: труды V Международной научно-технической конференции. –Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2010.–С.638-643.
3. *Тахман С.И.* Обобщённое описание зоны резания и исследование изменения главной составляющей силы резания при обработке прямозубых зубчатых колёс червячными фрезами/С.И. Тахман, О.А. Тюкалов//Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении: материалы Международной научно-технической конференции. – Курган: Изд-во КГУ, 2010.– С.152-157.
4. *Розенберг Ю.А., Тахман С.И.* Силы резания и методы их определения: учебное пособие.– Курган.: Изд-во КМИ, 1995.–Ч.1.–130с.
5. *Зорев, Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов.– М.: МашГиз, 1956.– 368с.

□Авторы статьи:

**Тахман**  
Симон Иосифович,  
докт. техн. наук, проф. каф. "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" (Курганский государственный университет). Тел.: 8-(3522) 23-04-05

**Рохин**  
Леонид Владимирович,  
канд.техн.наук, доц. каф. "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" (Курганский государственный университет). Тел.: 8-(3522) 23-04-05

**Тюкалов**  
Олег Александрович  
аспирант каф. "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты" (Курганский государственный университет)  
e-mail: [oleg\\_384@mail.ru](mailto:oleg_384@mail.ru)

УДК 621.01

Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов

### К ВОПРОСУ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА

В машиностроении для изготовления деталей машин очень часто используется феррито-перлитный серый чугун марок СЧ 15, СЧ 20. Однако, одним из факторов, который затрудняет более широкое его внедрение в промышленную практику, являются проблемы, возникающие при его упрочнении. Дело в том, что поверхностная закалка ТВЧ не применяется для серых чугунов из-за того, что процесс превращения феррита в аустенит является длительным, а объемная закалка обеспечивает только перлитные структуры. Традиционные методы диффузионного хромирования позволяют получить лишь небольшую глубину упрочненного слоя (0.010-0.040 мм) из-за образования карбидов.

Наиболее часто для упрочнения деталей из серого чугуна на сегодняшний день используются достаточно трудоемкие и весьма энергоемкие методы, такие как электролитическое хромирование и лазерная закалка [1,2], которые помимо всего прочего позволяют получить сравнительно небольшую толщину упрочненного слоя (до 0.25 мм).

Целью данной работы являлась разработка простой, надежной и экономически выгодной технологии поверхностного упрочнения деталей из феррито-перлитного серого чугуна, которая обеспечивает износостойкость их поверхности на необходимую толщину при минимальном изменении исходной микроструктуры и макрогеометрии.

Таблица 1. Оценка технического уровня метода диффузионного хромирования

№	Наименование показателя	Значение показателей			$q_i$	
		DP 055	YLR 3000	Дифф. хром		
1.	Производительность установки, шт/смену	3	3	4	1,3	1,3
2.	Толщина упрочненного слоя, мм	0,2	0,2	1,08	5,4	5,4
3.	Потребляемая мощность, кВт	50	20	10	5	2
4.	Относительная износостойкость упрочненного слоя	4	4	4	1	1
5.	Занимаемая площадь, м <sup>2</sup>	3	5	3	1	1,6
6.	Стоимость установки, тыс. руб.	1020	2500	100	10	25

В работе рассматривалось диффузионное хромирование оксидом хрома  $Cr_2O_3$ . Было сделано предположение, что поверхностной энергии основы серого чугуна хватит для диссоциации молекулы оксида хрома, атомы хрома и кислорода будут адсорбироваться, и диффундирующий внутрь атомарный кислород будет окислять элементы основы серого чугуна и устранять тем самым препятствия для диффузии хрома вглубь сплава. Эксперименты это убедительно подтвердили.

Для экспериментов диффузионного хромирования была выбрана цилиндрическая деталь в форме кольца из феррито-перлитного серого чугуна СЧ20. Деталь помещали в контейнер и нагревали в контакте с порошком хрома  $Cr_2O_3$  при 1173-1373 К в печи с графитовым нагревателем в течении 2, 4 и 8 часов. После выдержки в печи деталь подвергали поверхностной закалке. При исследовании поверхностного диффузионного слоя: измерялась глубина упрочненной зоны; определялась твердость и микротвердость до и после закалки, а также определялась удельная работа абразивного износа.

Твердость диффузионного слоя после хромирования до закалки 30-40HRC (твердость увеличилась в 2-2.5 раза), после закалки и отпуска - 58-65HRC (твердость увеличилась в 3-3.5 раза по сравнению с исходной). На рис. 1 показано распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя после хромирования и закалки по сравнению с лазерной закалкой [2].

Данное сравнение показывает, что предлагаемая сравнительно простая технология хромирования и поверхностной закалки феррито-перлитного серого чугуна обеспечивает микротвердость поверхностного слоя соизмеримую с лазерной закалкой высокопрочного чугуна ВЧ-40, но распределяется по толщине диффузионного слоя более равномерно и может обеспечивать глубину закаленного слоя почти в 2 раза большую, чем при обработке лазером. В отличие от лазерной обработки, микротвердость упрочненного диффузионного слоя по мере увеличения его глубины - воз-

растает. Кроме того, закалка лазером обеспечивает только закаленные дорожки на поверхности детали, в то время как диффузионное хромирование упрочняет всю поверхность детали.

В результате испытания образцов после диффузионного хромирования и закалки на абразивный износ, была получена удельная работа абразивного износа, соизмеримая с удельной работой абразивного износа высокохромистого чугуна и в 35-38 раз большей по сравнению с исходным серым чугуном СЧ20.

Эффективность разработанного метода диффузионного хромирования была оценена по коэффициентам технического уровня, которые определяются по «Временным методическим указаниям по оценке технического уровня и новизны научно-исследовательских и конструкторских работ». Оценка технического уровня производится по шести показателям:

- производительность процесса;
- толщина упрочненного слоя;
- потребляемая мощность;
- относительная износостойкость покрытия;
- площадь, занимаемая установкой;
- стоимость установки.

В ходе расчетов было проведено сравнение разработанной технологии с наиболее совершенным в техническом плане аналогом – лазерной закалкой. Процесс диффузионного хромирования производится в камерной печи, а для лазерной закалки рассмотрим два варианта – закалку при помощи промышленного твердотельного лазера DP 055 и промышленного волоконного лазера YLR-3000 как более совершенного в техническом плане. Оценка технического уровня приведена в табл. 1.

Коэффициенты технического уровня определяются следующим образом:

$$K_{TY} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n},$$

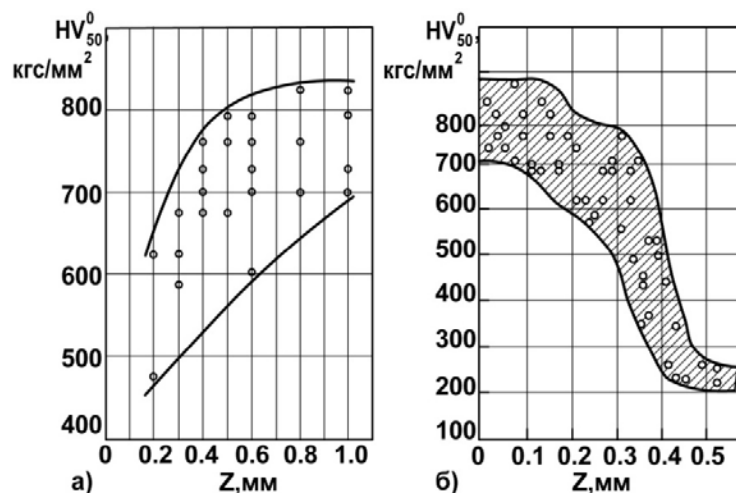


Рис. 1. Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя после закалки (а) в сравнении с закалкой лазером (б)

где  $n$  – количество сравниваемых показателей;

$q_i$  – соотношение показателей принятого и проектируемого процесса.

Для 1, 2 и 4 показателя:

$$q_i = \frac{P_{PR}}{P_{AH}}$$

Для 3, 5 и 6 показателя:

$$q_i = \frac{P_{AH}}{P_{PR}},$$

где  $P_{PR}, P_{AH}$  численные значения показателей аналога и проектируемого процесса.

Коэффициент технического уровня по совокупности показателей для аналога DP 055:

$$K_{TY1} = \frac{\sum q_i}{n} = \frac{1,3 + 5,4 + 5 + 1 + 1 + 10}{6} = 3,95$$

Коэффициент технического уровня по сово-

купности показателей для аналога YLR 3000:

$$K_{TY2} = \frac{\sum q_i}{n} = \frac{1,3 + 5,4 + 2 + 1 + 1,6 + 25}{6} = 6,1$$

Коэффициенты технического уровня метода диффузионного хромирования по сравнению с аналогами существенно больше единицы. Это говорит о том, что технический уровень разработанного процесса диффузионного упрочнения соответствует лучшим достижениям в области упрочнения поверхностей деталей из серого чугуна.

**Заключение:** Как видно из таблицы 1 разработанная технология позволяет снизить энергопотребление при упрочнении деталей из серого чугуна в 2-5 раз, при этом обеспечить глубину упрочненного слоя более чем в 5 раз большую, чем при обработке лазером и снизить капитальные затраты в 10-25 раз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. / В.Я. Панченко [и др.]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с.
2. Ковенский И.М. Металловедение покрытий. Учебник для вузов. / И.М. Ковенский, В.В. Поветкин. М.: Интернет Инжиниринг, 1999. -296с.
3. Гуревич Ю.Г. Поверхностное упрочнение деталей из серого чугуна / Ю.Г. Гуревич, В.В. Марфицын, В.А. Фролов // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение. – 2010. - №05. – с 41-45.
4. Гуревич Ю.Г. Поверхностное упрочнение деталей из феррито-перлитного серого чугуна диффузионным хромированием. / Ю.Г. Гуревич, В.А. Фролов, В.Е. Овсянников // Компьютерное моделирование физико-химический свойств стекол и расплавов: Труды X Российского семинара под общ. ред. Б.С.Воронцова. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – с 98-99.
5. Гуревич Ю.Г. Разработка инновационной технологии поверхностного упрочнения деталей из серого чугуна. / Ю.Г. Гуревич, В.А. Фролов, В.Е. Овсянников // Инновационные технологии в автоматизированном машиностроении и арматуростроении: Материалы международной научно-технической конференции. - Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2010. – с 198-201.

□ Авторы статьи:

Гуревич  
Юрий Григорьевич,  
докт. техн. наук, проф каф. инно-  
вативки и менеджмента качества  
(Курганский государственный уни-  
верситет), email: ygg@rambler.ru

Овсянников  
Виктор Евгеньевич,  
канд. техн. наук, старший препод.  
каф. «Автомобили» (Курганский  
государственный университет),  
email: panz12@rambler.ru, ,

Фролов  
Виктор Александрович, ру-  
ководитель УВП.  
(Курганский государственный уни-  
верситет)