

**ПЕРМЯКОВ А.А., ЮЧРШИН О.Я., ПЕРМИНОВ Е.В., ШЕПЕЛЕВ Д.К.**

## **ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ РЕЕК**

Изучены инновационные технологические направления для обеспечения стабилизации процесса обработки зубчатых реек с учетом специфических условий формообразования, структуры технологического процесса обработки, формы рейки, влияющей на выбор технологического оборудования и выбор технологических баз, степени точности, параметров шероховатости рабочих поверхностей зубьев. Предложено оригинальное решение выбора технологического способа подготовки зубообрабатывающего инструмента при обеспечении стабилизации процесса формообразования для достижения параметров точности обработки реек с учетом формирования оптимальной геометрии, и состояния поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента (радиус округления режущей кромки и вершин зубообрабатывающего инструмента, шероховатости, микротвердости и остаточных напряжений режущей части зубообрабатывающего инструмента), характерных для данных условий обработки (обрабатываемый материал, материал режущей части инструмента, режимы резания, стабилизация сил резания, СОЖ, жесткость технологической системы). Приведены экспериментальные зависимости, позволяющие рассчитывать насыщение зубообрабатывающего инструмента из быстрорежущей стали дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в жидком азоте.

**Ключевые слова:** инновационные технологические процессы, стабилизация, зубчатые рейки, параметры шероховатости, зубообрабатывающий инструмент, радиус округления режущей кромки, насыщение инструмента дисульфидом молибдена, термодиффузионный способ.

**ПЕРМЯКОВ А.А., ЮЧРШИН О.Я., ПЕРМИНОВ Е.В., ШЕПЕЛЕВ Д.К.,  
ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ НАПРЯМКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЗУБЧАТИХ РЕЙОК**

Вивчено інноваційні технологічні напрямки для забезпечення стабілізації процесу обробки зубчастих рейок з урахуванням специфічних умов формоутворення, структури технологічного процесу обробки, форми рейки, що впливає на вибір технологічного обладнання та вибір технологічних баз, ступеня точності, параметрів шорсткості робочих поверхонь зубів. Запропоновано оригінальне рішення вибору технологічного способу підготовки зубообробного інструменту при забезпеченні стабілізації процесу формоутворення для досягнення параметрів точності обробки рейок з урахуванням формування оптимальної геометрії, і стану поверхневого шару ріжучої частини зубообробного інструменту (радіус округлення різальної кромки і вершин зубообробного інструменту, шорсткості, микротвердості і залишкових напруж ріжучої частини зубообробного інструменту), характерних для даних умов обробки (опрацьований матеріал, матеріал ріжучої частини інструменту, режими різання, стабілізація сил різання, МОР, жорсткість технологічної системи). Наведено експериментальні залежності, які дозволяють розраховувати насичення зубообробного інструменту зі швидкорізальної сталі дисульфідом молибдену термодифузійним способом з подальшою обробкою в рідкому азоті.

**Ключові слова:** інноваційні технологічні процеси, стабілізація, зубчасті рейки, параметри шорсткості, зубообробний інструмент, радіус округлення різальної кромки, насичення інструменту дисульфідом молибдену, термодифузійний спосіб.

**PERMYAKOV A.A., YUCHRSHIN O.Y., PERMINOV E.V., SHEPELEV D.K.  
INNOVATIVE TECHNOLOGICAL DIRECTIONS FOR ENSURING STABILIZATION OF THE PROCESS OF PROCESSING OF GEARS**

Innovative technological areas to ensure stabilization of the gear rack processing process taking into account the specific conditions of shaping, the structure of the technological process of processing, the shape of the rack, which affects the choice of technological equipment and the choice of technological bases, the degree of accuracy, and the roughness parameters of the working surfaces of the teeth were studied. An original solution is proposed for choosing a technological method for preparing a gear cutting tool while ensuring stabilization of the shaping process to achieve accuracy parameters for processing the slats taking into account the formation of the optimal geometry, and the state of the surface layer of the cutting part of the gear cutting tool (radius of rounding of the cutting edge and vertices of the gear processing tool, roughness, microhardness and residual stresses cutting part of the gear) data processing conditions (the processed material, the material of the cutting part of the tool, cutting conditions, stabilization of cutting forces, coolant, rigidity of the technological system). Experimental dependences that allow calculating the saturation of a tooth-processing tool made of high-speed steel with a molybdenum disulfide by the thermal diffusion method followed by treatment in liquid nitrogen were presented.

**Key words:** innovative technological processes, stabilization, gear racks, gear parameters, gear tool, circular rounded cutting edge, instrument equipped with molybdenum, thermal diffusion.

**1.Введение.** Структура технологического определяют основные требования к структуре

проце

сса

обаб

отки зубчатых реек зависит от формы рейки, влияющей на выбор технологического оборудования и выбор технологических баз, степени точности, параметров шероховатости рабочих поверхностей зубьев.

Нормы точности зубчатых реек: кинематической точности, плавности работы, контакта зубьев регламентируются предельными отклонениями и допусками в зависимости от геометрических параметров и функциональных зависимостей и

© А.А. Пермяков, О.Я. Ючршин, С.П.Сапон, Д.К.Шепелев, 2020

технологического процесса

**2.Основная часть.** В соответствии с проведенными исследованиями по изучению параметров зубонарезания реек и их влиянию на стабилизацию процесса формообразования (Рис. 1) рассмотрены зависимости изменения оптимального угла рассогласования  $\beta_{opt}$  от обрабатываемого модуля зубчатой рейки при различных

технологических режимах обработки.

Установлено, что при увеличении подачи оптимальный угол увеличивается, при уменьшении подачи – уменьшается [1, 4, 5, 6, 11]. Данные

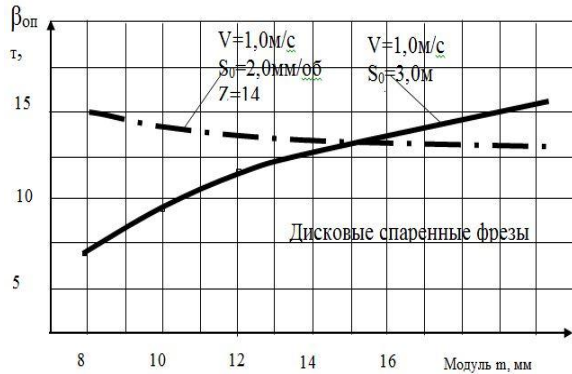


Рис.1 – Зависимость изменения оптимального угла рассогласования  $\beta_{опт}$  от обрабатываемого модуля зубчатой рейки при различных технологических режимах обработки

Изменение наибольшего угла контакта зуба фрезы с обрабатываемой рейкой представлено на рис. 2.

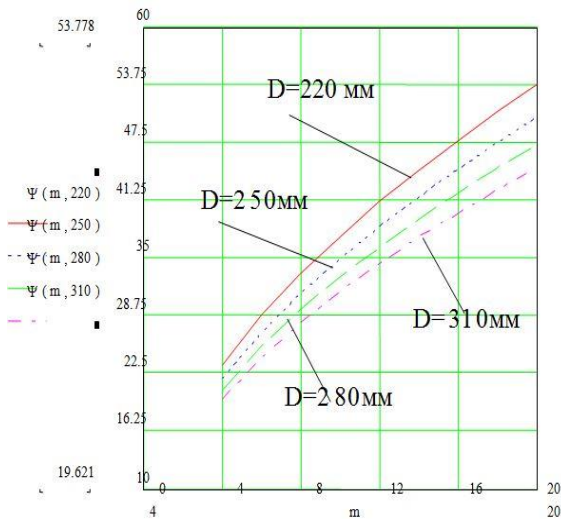


Рис. 2 – Изменение угла контакта зуба фрезы с обрабатываемой рейкой

В процессе формообразования при рассмотрении фрезерования как дискретного перемещения зуба фрезы, каждая точка активной части режущего лезвия имеет свою траекторию и этим самым определяет способность поверхностных слоев инструмента сопротивляться разрушению при сходе стружки по передней поверхности и трению скольжения по задним поверхностям, а также при микроперемещениях, обусловленных воздействием вибраций в процессе обработки [2, 7, 10].

Геометрия зуборезного инструмента имеет форму, которая рассчитывается только в зависимости от схемы зубонарезания без учета износа инструмента при эксплуатации. Поэтому технологическая подготовка инструмента при обеспечении стабилизации процесса формообразования играет существенную для достижения параметров зубонарезания реек.

зависимости позволяют прогнозировать разработку технологической оснастки для установки и закрепления комплектов дисковых зуборезных фрез.

Наличие износа режущего инструмента приводит к снижению точности обработки зубчатых реек, увеличению динамических нагрузок и росту сил резания, что ведет к снижению стойкости зубообрабатывающего инструмента, появлению преждевременных отказов [2, 7, 9]. В условиях современного уровня технологии машиностроения необходимо управлять с большой вероятностью процессами формообразования, а значит, и обеспечить заданный износ инструмента, исходя из условий точности обработки реек (Рис. 3).

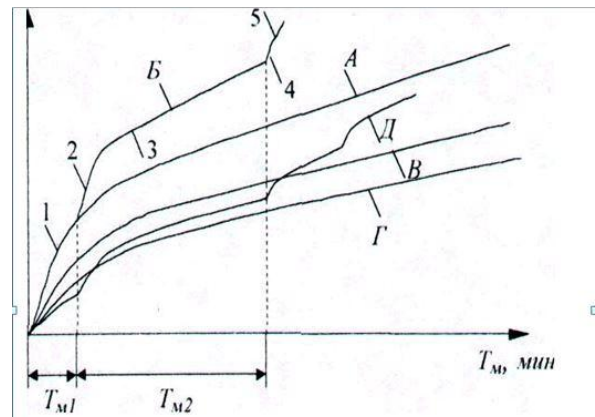


Рис. 3 – Кривые износа режущей части зуборезных дисковых фрез по задней поверхности при встречном фрезеровании:

- А - для не изменяющихся условий резания;
- Б - для обычных фрез при изменяющихся условиях резания;
- В - для не изменяющихся условий резания при оптимальной геометрии фрез;
- Г - для постоянных условий работы фрез при оптимальной геометрии с нанесенным износостойким покрытием;
- Д - для быстро прирабатывающихся фрез при изменяющихся условиях.

Рассмотрим технологические способы подготовки зубообрабатывающего инструмента при обеспечении стабилизации процесса формообразования для достижения параметров точности обработки реек (Рис. 4).

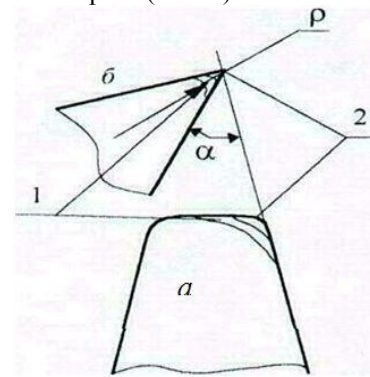


Рис. 4 – Износ вершин профильной части дисковых зуборезных фрез;

- а - формирование радиуса при вершине;
- б - формирование радиуса округления режущей кромки;
- 1 - период приработки;

2 - период нормального износа;  
 $\rho$  - радиус округления режущего лезвия инструмента;  
 $\alpha$  - задний угол фрезы.

Физическая картина износа зубообрабатывающего инструмента. Износ зубообрабатывающего инструмента описывают зависимостью величины износа от машинного времени (кривая А на рис 4), которая получается при постоянных, не изменяющихся условиях резания. Первоначальный интенсивный износ, соответствующий периоду приработки, объясняется формированием оптимальной геометрии, и состояния поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента (радиус округления режущей кромки и вершин зубообрабатывающего инструмента, шероховатости, микротвердости и остаточных напряжений режущей части зубообрабатывающего инструмента), характерных для данных условий обработки (обрабатываемый материал, материал режущей части инструмента, режимы резания, стабилизация сил резания, СОЖ, жесткость технологической системы). В этот период происходит интенсивный молекулярный износ, и разрушение выступов шероховатости рабочей части зубообрабатывающего инструмента на участках наибольших давлений. Это приводит к изменению геометрии и микрогеометрии режущего участка зубообрабатывающего инструмента, что способствует постепенному выравниванию рабочих давлений в зоне резания и равномерности износа различных участков режущего клина (рис 4).

Состояние поверхностного слоя рабочих участков вершин, режущих кромок, задних и передней поверхности зубообрабатывающего инструмента также претерпевают изменение, приобретая постепенно так называемое «равновесное состояние» [3, 10] Все это приводит к постепенному переходу к нормальному износу зубообрабатывающего инструмента, которому соответствует сформировавшаяся оптимальная геометрия и состояние поверхностного слоя режущей части инструмента для данных условий обработки. Причем этот переход бывает плавным и зачастую трудно строго разграничить участок приработки и нормального износа. Постепенное накопление усталости в поверхностном слое материала режущей части зубообрабатывающего инструмента приводит к его разрушению, т.е. к началу катастрофического износа.

Однако, эта физическая картина периодичности износа свойственна для зубообрабатывающего инструмента, работающего при постоянных не изменяющихся условиях обработки (серийное, крупносерийное производство зубчатых реечных передач). При мелкосерийном и индивидуальном производстве инструмент, как правило, работает при изменяющихся условиях обработки (обрабатываемый материал, режимы резания). Это приводит к тому, что их рабочая часть должна постоянно приспосабливаться к новым условиям обработки. Размерный износ зубообрабатывающего инструмента

для данного случая можно описать кривой - Б (рис. 3). Причем в зависимости от количества деталей в партии износ зубообрабатывающего инструмента может и не выйти из периода приработки (рис. 3, участок 1, кривой Б), так как изменившиеся условия обработки приведут к новому периоду приработки (рис. 2.10, участок 2, кривой Б).

Математическое описание интенсивности износа зубообрабатывающего инструмента рассчитывается по формуле [2, 10]

$$I_h = \frac{\chi}{n \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{h}{\rho}} \cdot \frac{A_r}{A}, \quad (1)$$

где  $n$  - число циклов воздействия, которое приводит к разрушению материала. Поверхностные остаточные напряжения приводят к соответствующему изменению данного числа циклов. Это изменение учитывается с помощью коэффициента, определяемого из равенства [2, 8].

$$\lambda = \left( \frac{\sigma_b - \sigma_t}{\sigma_a} \right)^{t_y}, \quad (2)$$

где  $\sigma_b$  - временное сопротивление разрыву;  $\sigma_t$  - предел текучести;  $\sigma_a$  - действующая величина амплитудного напряжения в рабочем слое;  $t_y$  - параметр фрикционной усталости материала режущей части зубообрабатывающего инструмента при упругом контакте;  $\chi$  - параметр, рассчитываемый по формуле:

$$\chi = \frac{1}{2 \cdot (v + 1)} \cdot \sqrt{\frac{v}{2 \cdot \alpha_k}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_k$  - коэффициент, учитывающий отличие площади сечения выступов на уровне  $\rho$  от величины фактической площади контакта на том же уровне. В соответствии с разработанной теорией контактного взаимодействия деталей машин  $\alpha_k = 1$ ;  $v$  - параметр опорной кривой профиля шероховатости вершин зубообрабатывающего инструмента ( $v = 2$  [2]).

Учитывая значительные контактные давления при фрезеровании, можно принимать, что фактическая площадь контакта инструмента с обрабатываемой заготовкой равна номинальной площади, т.е.  $A_p = A$ , и следовательно  $A_r/A = 1$ . Из этих же соображений  $h = R_z$  [2]. При фрезеровании, для расчета интенсивности износа, в качестве локального выступа шероховатости  $\rho$  можно принимать радиус округления режущей кромки зубообрабатывающего инструмента [2].

При достаточно большом машинном времени обработки новой партии деталей ( $T_{M2}$ ), износ зубообрабатывающего инструмента перейдет к нормальному (рис. 3, участок 3, кривой Б) Однако изменение условий обработки (изготовление новой партии деталей) приведет к новому периоду приработки (рис. 3, участок 4, кривой Б) и т.д. Естественно, что изменяющиеся условия работы зубообрабатывающего инструмента приводят к

ускорению катастрофического износа (рис. 3, участок 5, кривой Б) и к снижению качества обрабатываемой поверхности.

Описанная физическая картина периодичности износа зубообрабатывающего инструмента и установленные причины, определяющие их износостойкость, позволяют наметить общие возможности повышения износостойкости зубообрабатывающего инструмента [2, 5, 7]. Для

зубообрабатывающих инструментов, работающих при определенных, неизменных условиях, на стадии их изготовления, необходимо обеспечить оптимальную геометрию и состояние поверхностного слоя его рабочей части. Так, оптимальные значения радиуса округления режущей кромки зубообрабатывающего инструмента из различных материалов в зависимости от обрабатываемого материала зубчатых изделий приведены в табл. 1.

Таблица – 1 Оптимальный радиус округления режущей кромки РИ  $\rho$  при обработке различных материалов зубчатых реек и колес

Обрабатываемый материал	Материал режущего лезвия зубообрабатывающего	Оптимальный радиус округления, $\rho$ , мкм
Сталь 45	P6M5	10
Сталь 40X	P6M5	8
Сталь АЦ40X	P6M5	10
Счаль 4 5	BK8	55
Сталь 40X	BK8M	50
Сталь АЦ40X	BK8	55
Чугун СЧ18	BK8	60

Обеспечение оптимального значения этого радиуса осуществляется технологией заточки зубообрабатывающего инструмента и доводки режущей кромки. Оптимальное состояние поверхностного слоя рабочих участков зубообрабатывающего инструмента определяется их материалом и достигается технологией заточки и термообработки. Комплексно обеспечить оптимальную геометрию и состояние поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента, как показала практика, позволяет для сборных дисковых фрез, оснащенных неперетачиваемыми твердосплавными пластинками, виброабразивная обработка, для фрез быстрорежущих - доводка алмазными кругами. Если все эти мероприятия не дают должного эффекта, то прибегают к нанесению различных износостойких покрытий для твердосплавных пластинок и для инструментов, изготовленных из быстрорежущих сталей, путем насыщения дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в жидком азоте [73].

В настоящее время среди многих способов термодиффузионных покрытий в области повышения износостойкости металлорежущего инструмента наибольшее распространение получили способы термодиффузионного борирования, хромирования и последовательного насыщения инструментальных сталей хромом и бором. После хромирования и борирования инструмента необходима механическая обработка, что приводит к дополнительным затратам [2, 8, 11].

С целью повышения стойкости инструмента после диффузионного насыщения перед обработкой

инструмента производить его нагрев с выдержкой при температуре 240...260°C в термопечи, а после обработки производить выдержку в щелочной ванне при температуре 165...1700С.

Последовательность насыщения инструмента дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в среде жидкого азота показана на рис. 5.

При нагреве инструмента из быстрорежущей стали в слабо окислительной среде образуется поверхностный слой, прочно связанный с металлом, который заменяет процесс напыления дисульфидом молибдена механическим натиранием. В этом случае прочный поверхностный слой, обладающий повышенной адгезией осажденного слоя с металлом образуется за счет полного разложения глицерина и взаимодействия продуктов его разложения с дисульфидом молибдена.

При выборе температуры нагрева учитывались свойства глицерина. Как известно, температура разложения глицерина 260°C. При его разложении образуются различные виды производных: глицериновый альдегид и диоксиацетон, что в данных условиях термообработки способствует появлению смолистых веществ, которые в процессе спекания и коксования образуют прочно связанные с металлом защитные пленки. Защитные пленки с дисульфидом молибдена увеличивают стойкость зубообрабатывающего инструмента.

Последующая обработка изделий в щелочной ванне позволяет удалить нестойкие частицы поверхностного слоя, размягчить его, что устраняет разрушение поверхностной пленки при обработке в среде жидкого азота и образует твердую

оболочку, повышающую прочность сцепления покрытая с поверхностью инструмента при возникновении сверхвысоких давлений в среде жидкого азота.

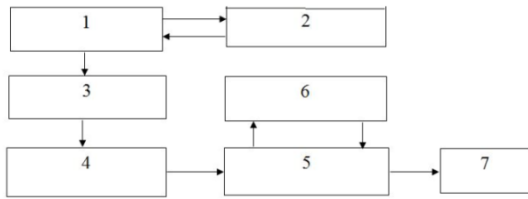


Рис. 5 – Схема насыщения зубообрабатывающего инструмента из быстрорежущей стали дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в жидком азоте:

1 - обезжиривание инструмента, промывка в холодной ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ) и горячей воде ( $T=40...60^{\circ}\text{C}$ ), сушка в потоке нагретого воздуха в специальных шкафах; 2 – травление инструмента с целью удаления дефектных покрытий; 3 - диффузионное насыщение в глицерине при  $T=180...200^{\circ}\text{C}$  добавляется 50...60 г дисульфида молибдена на- 1000 г глицерина, выдержав в растворе 2 ч при  $T=200 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ; 4 - термическая обработка в печи при  $T=240...260^{\circ}\text{C}$ ; 5 - щелочная обработка с последующей промывкой в холодной и горячей воде; 6 - обработка в среде жидкого азота; 7 – консервация

Были опробованы различные составы и режимы работы щелочной ванны. Наибольшая интенсивность обработки была получена в щелочной ванне, раствор которой содержит: едкий натр в количестве 1300 г/л, азотнокислый натрий в количестве 100 г/л. Температура обработки  $165...170^{\circ}\text{C}$ .

Время выдержки инструмента  $t$  в щелочной ванне зависит от массы  $M$  одновременной загрузки зубообрабатывающего инструмента  $t = M \cdot K$ , мин, где  $K$  - коэффициент сложности профиля инструмента; например, для дисковой зуборезной фрезы  $K=1$ , червячной модульной фрезы  $K=2,2$ , масса загрузки в кг.

Процесс обработки инструмента в щелочной ванне включает две фазы: доведение температуры щелочной ванны до заданной без инструмента и доведение температуры ванны после загрузки инструмента до заданной (раствор закипает снова) и щелочная обработка инструмента.

Повторная обработка инструмента в щелочном растворе после обработки в среде жидкого азота стабилизирует поверхностные напряжения в защитном слое, что обеспечивает высокое качество обработки поверхностного слоя зубчатых реек.

Предварительное материаловедческое и технологическое обеспечение оптимальной геометрии и состояния поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента позволяет практически избежать периода приработки - кривая В (рис. 3), а, следовательно, в значительной мере, повысить их стойкость. Нанесение износостойких покрытий из нитрида титана и насыщение рабочих поверхностей зубообрабатывающего инструмента дисульфидом молибдена, также способствует уменьшению интенсивности износа в установившейся

период их работы. Совместное, комплексное проведение этих мероприятий позволяет достичь суммарного эффекта в повышении износостойкости зубообрабатывающего инструмента - кривая Г (рис. 3).

Вышеизложенные мероприятия, хорошо показавшие себя на зубообрабатывающем инструменте, работающих при неизменных условиях обработки, не могут быть достаточно эффективными при изменяющихся условиях обработки, когда, как показывает практика, они постоянно работают в периоде приработки. Для повышения износостойкости таких зубообрабатывающих инструментов применяют быструю прирабатываемость, т.е. значительно сокращают периоды приработки. Износ этих зубообрабатывающих инструментов можно представить в виде кривой - Д (рис. 3). Технологически это можно обеспечить за счет нанесения многослойных покрытий на режущей части зубообрабатывающих инструментов, виброабразивной обработки с последующим нанесением износостойких покрытий со среднестатической оптимальной геометрией. Так многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что среднестатическим оптимальным радиусом округления режущей кромки зубообрабатывающего инструмента оснащенного твердосплавными пластинками при чистовом фрезеровании зубьев будет  $r=50$  мкм, для быстрорежущих дисковых зуборезных фрез  $r=10$  мкм, которые технологически обеспечиваются при определенных режимах виброабразивной обработки и алмазной доводкой на заточных станках. Особенно эффективной, в этих случаях, может быть, так называемая "ионная имплантация", позволяющая создавать послойно изменяющийся состав материала.

На качество обработанной поверхности влияет направление неровностей при заточке передней поверхности зубообрабатывающих инструментов [2, 5, 11] во взаимосвязи с процессом наростообразования при создании технологических условий схода наростообразования в период приработки инструмента [8, 11].

**Выводы.** Разработаны инновационные технологические для обеспечения стабилизации процесса обработки зубчатых реек с учетом специфических условий формообразования, структуры технологического процесса обработки, формы рейки, влияющей на выбор технологического оборудования и выбор технологических баз, степени точности, параметров шероховатости рабочих поверхностей зубьев.

Предложена оригинальное решение выбора технологического способа подготовки зубообрабатывающего инструмента при обеспечении стабилизации процесса формообразования для достижения параметров точности обработки реек с учетом формирования оптимальной геометрии, и состояния поверхностного слоя режущей части зубообрабатывающего инструмента (радиус округления режущей кромки и вершин

зубообробляючого інструмента, шероховатості, мікротвердості і остаточних напружень режущої частини зубообробляючого інструмента).

Рассмотрены характерных для данных условий обработки обрабатываемый материал, материал режущей части инструмента, режимы резания, стабилизация сил резания, СОЖ, жесткость технологической системы.

Приведены экспериментальные зависимости, позволяющие рассчитывать насыщение зубообробляючого інструмента из быстрорежущей стали дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в жидком азоте.

#### Список литературы:

1. Ключко О.О., Юрчишин О.Я., Охріменко О.А., Семінська Н.В. *Функціональний зв'язок умов обробки з параметрами стану поверхні зубів рейок*. ISSN 2521-1943. MECHANICS AND ADVANCED TECHNOLOGIES #3 (87), 2019 – С.91 – 99.
2. *Новые технологические направления чистовой обработки зубчатых реек* / А. А. Ключко, Н. И. Зиновьев, Ю. А. Ключко, Е. В. Мironenko // Високі технології в машинобудуванні :зб. наук. пр. ХДПУ. – Харків, 2000. – Вип. 1(3). –С. 138–145..
3. Мironenko E. V. *Взаимосвязь мощности и крутящего момента при формообразовании зубьев колес и реек* / Е. В. Мironenko, А. А. Ключко // *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2007. – Вип. 22. – С. 30–34.
4. Shah, C., Thigale, S., & Shah, R. (2018). *Optimizing weight of a Gear using Topology Optimization*. International Journal of Science, Engineering and Technology Research 7(6), 403- 406.
5. Gavranovic, S., Hartmann, D., & Wever. (2015). *U.Topology Optimization using GPGPU*. EUROGEN 2015. September 14-16, Glasgow, UK.
6. Mohammadkhani, R., Nemati, D., & Babaei B. (2012). *Optimizing Helical Gear Profile for Decreasing Gearbox Noise*. Journal of Basic and Applied Research International 2, 6685-6693.
7. Мironenko E. V. *Технология предварительной обработки закаленных зубчатых колес и реек дисковыми сборными фрезами с раздельной схемой резания* / Е. В. Мironenko, А. А. Ключко, В. С. Лебединский // *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – Вип. 28. – С. 219–225
8. Мironenko E. V. *Топография износа зубонарезного инструмента при формообразовании зубчатых реек* / Е. В. Мironenko, А. А. Ключко // *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем*: сб. науч. тр. – Краматорск : К. : ДГМА, 2008. – Вип. 23. – С. 69–73.
9. Czerniec, M., Kielbiński, J., & Czerniec, J. (2019). *Computer Simulation of the Impact of Optimization of Width in the Helical Cylindrical Gear on Bearing and Durability. Part I. Height Correction of the Gear Profile*. Advances in Science and Technology. Research Journal, 13(1), 52–59.

10. Jian, K., Li-Ping, Z., & Wen-Qiang, Y. (2013). *Optimization Design of a Gear Profile Based on Governing Equations*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(19), 4780-4784.

11. *Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес*: монография / А. А. Ключко [и др.]. – Краматорск ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667

#### References (transliterated)

1. Klochko O.O., Yurchishin O.Ya., Okhri`menko O.A., Semi`ns`ka N.V. *Funkcz`ional`nij zv'yazok umov obrobki z parametrami stanu poverkhn`i zubiv` relok*. ISSN 2521-1943. MECHANICS AND ADVANCED TECHNOLOGIES #3 (87), 2019 – S.91 – 99.
2. *Novy`e tekhnologicheskie napravleniya chistovoj obrabotki zubchaty`kh reek* / A. A. Klochko, N. I. Zinov`ev, Yu. A. Klochko, E. V. Mironenko // *Visoki` tekhnologi`yi v mashinobuduvanni`* :zb. nauk. pr. KhDPU. – Kharki`v, 2000. – Vip. 1(3). –S. 138–145..
3. Mironenko E. V. *Vzaimosvyaz` moshnosti i krutyashhego momenta pri formoobrazovanii zub`ev koles i reek* / E. V. Mironenko, A. A. Klochko // *Nadezhnost` instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem* : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2007. – Vy`p. 22. – S. 30–34.
4. Shah, C., Thigale, S., & Shah, R. (2018). *Optimizing weight of a Gear using Topology Optimization*. International Journal of Science, Engineering and Technology Research 7(6), 403- 406.
5. Gavranovic, S., Hartmann, D., & Wever. (2015). *U.Topology Optimization using GPGPU*. EUROGEN 2015. September 14-16, Glasgow, UK.
6. Mohammadkhani, R., Nemati, D., & Babaei B. (2012). *Optimizing Helical Gear Profile for Decreasing Gearbox Noise*. Journal of Basic and Applied Research International 2, 6685-6693.
7. Mironenko E. V. *Tekhnologiya predvaritel`noj obrabotki zakalenny`kh zubchaty`kh koles i reek diskovimi sbornymi frezami s razdel`noj skhemoj rezaniya* / E. V. Mironenko, A. A. Klochko, V. S. Lebedinskij // *Nadezhnost` instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem* : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2011. – Vy`p. 28. – S. 219–225
8. Mironenko E. V. *Topografiya iznosa zubonareznogo instrumenta pri formoobrazovanii zubchaty`kh reek* / E. V. Mironenko, A. A. Klochko // *Nadezhnost` instrumenta i optimizaciya tekhnologicheskikh sistem*: sb. nauch. tr. – Kramatorsk : K. : DGMA, 2008. – Vy`p. 23. – S. 69–73.
9. J. Czerniec, M., Kielbiński, J., & Czerniec, J. (2019). *Computer Simulation of the Impact of Optimization of Width in the Helical Cylindrical Gear on Bearing and Durability. Part I. Height Correction of the Gear Profile*. Advances in Science and Technology. Research Journal, 13(1), 52–59.
10. Jian, K., Li-Ping, Z., & Wen-Qiang, Y. (2013). *Optimization Design of a Gear Profile Based on Governing Equations*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 5(19), 4780-4784.
11. *Tekhnologicheskie osnovy` zuboobrabotki zakalenny`kh krupnomodul`ny`kh zubchaty`kh koles*: monografiya / A. A. Klochko [i dr.]. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – 479 s. ISBN 978-966-379-667-3.

Поступила (received) 15.05.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Пермяков Олександр Анатолійович (Пермяков Александр Анатольевич, Permyakov Alexander Anatolyevich)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (057) 720-66-25, ORCID: 0000-0002-9589-0194

**Юрчишин Оксана Ярославівна (Юрчишин Оксана Ярославовна, Yurchyshyn Oksana)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, просп. Перемоги, 37, тел 097-796-45-23, e mail: [urchyshynoks@ukr.net](mailto:urchyshynoks@ukr.net).

**Перминов Євген Віталійович (Перминов Евгений Витальевич, Perminov Evgeny Vitalievich)** – аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (099) 510-31-62, e mail: [gekauta@gmail.com](mailto:gekauta@gmail.com).

***Шепелев Дмитро Костянтинович (Шепелев Дмитрий Константинович, Shepelev Dmitry Konstantinovich)***  
– аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (057) 720-66-25, , ORCID 0000-0001-9494-7892