

Г.Ю. МАРТЫНЕНКО, С.А. МИРОНЕНКО, Т.Е. ТРЕТЯК

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБКАТОЧНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НЕЭВОЛЬВЕНТНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С УЛУЧШЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Рассматриваются вопросы конструкторско-технологической разработки инструментального обеспечения для производства усовершенствованных зубчатых колес. Разработка основана на специальном прикладном развитии математической теории многопараметрических отображений пространства. В выполненной разработке зуборезных инструментов для профилирования неэвольвентных зубчатых колес предусматривается недопущение искажения профилирования после переточек инструмента. Предложены алгоритмы расчета, которые могут использоваться в информационном обеспечении соответствующих CAD/CAM систем обслуживания инструментальных производств. Среди разработанных инструментов – сборные долбяки с призматическими и круглыми резами. Компенсационные возможности предлагаемых сборных долбяков обеспечиваются изменением положения фасонных режущих кромок после их переточек: соответственно линейным перемещением призматических фасонных резцов и поворотом круглых резцов.

Ключевые слова: усовершенствованная зубчатая передача, зуборезный долбяк, неэвольвентное зубчатое колесо, многопараметрические отображения пространства, эквивалентные напряжения, эквивалентные деформации, суммарное смещение.

Г.Ю. МАРТИНЕНКО, С.О. МИРОНЕНКО, Т.Є. ТРЕТЯК

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБКАТНИХ РІЗУЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ФОРМОУТВОРЕННЯ НЕЕВОЛЬВЕНТНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС З ПОЛІПШЕНИМИ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Розглядаються питання конструкторсько-технологічної розробки інструментального забезпечення для виробництва удосконалених зубчастих коліс. Розробка заснована на спеціальному прикладному розвитку математичної теорії багатопараметричних відображень простору. У виконаній розробці зуборізних інструментів для профілювання неэвольвентних зубчастих коліс передбачається недопущення спотворення профілювання після переточувань інструменту. Запропоновано алгоритми розрахунку, які можуть використовуватися в інформаційному забезпеченні відповідних CAD / CAM систем обслуговування інструментальних виробництв. Серед розроблених інструментів - збірні долбяки з призматичними та круглими різцями. Компенсаційні можливості пропонувані збірних долбяків забезпечуються зміною положення фасонних різальних крайок після їх переточувань: відповідно лінійним переміщенням призматичних фасонних різців та поворотом круглих різців.

Ключові слова: вдосконалена зубчаста передача, зуборізний долбяк, неэвольвентне зубчасте колесо, багатопараметричні відображення простору, еквівалентні напруження, еквівалентні деформації, сумарний зсув.

G.Y. MARTINENKO, S.A. MIRONENKO, T.E. TRETYAK

SIMULATION MODELING OF RUNNING CUTTERS FOR SHAPING OF NONINVOLUTE TOOTH GEARS WITH IMPROVED FUNCTIONAL PROPERTIES

The questions of tooling design for production of advanced gears are considered. Engineering is based on the special applied development of the mathematical theory of multiparametric mappings of space. In fulfilled engineering of gear cutting tools for shaping of noninvolute gears it is provided for exclusion of distorted profiling after tool regrinds. There are proposed calculation algorithms, which may be used in dataware of respective CAD/CAM systems of maintenance for tooling backup. Among developed tools there are assembled shaping cutters with prismatic and round cutters. Compensatory possibilities of proposed assembled shaping cutters are ensured by repositioning of shaped cutting edges after their regrindings: by linear displacement of prismatic shaped cutters and angular displacement of round ones respectively.

Keywords: advanced gearing, gear cutter, cylindrical gear, constant normal pitch, multiparametric mappings of space, displacement summary, strain equivalent, stress equivalent.

Введение. На передовых производственных объединениях Украины большое внимание уделяется созданию единых информационных платформ и развитию имитационного моделирования. Наиболее успешно имитационное моделирование применяется в инструментальном производстве как наукоемкой сфере механообработки. Предлагаемые в данной статье модели обкаточных инструментов являются совокупностью геометрических и физико-механических состав-

ляющих. Формообразование у таких инструментов выполняется по методу обкатки, при котором рабочее и станочное зацепления совпадают. Это позволяет значительно повысить скорость и точность обработки изделий.

При переточках монолитного фасонного долбяка для обработки неэвольвентных зубчатых колес форма режущей кромки изменяется. Кроме того, погрешность формы обрабатываемого зубчатого колеса воз-

© Г.Ю. Мартыненко, С.А. Мироненко, Т.Е. Третьак, 2018

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ».
Серія: Динаміка і міцність машин. № 38 (1314). 2018*

никает вследствие уменьшения межосевого расстояния при смещении долбяка. В связи с этим актуальной становится задача разработки инструментов, после переточек которых незвольвентный профиль обрабатываемого зубчатого колеса геометрически не изменяется.

В качестве вариантов обкаточных зуборезных инструментов для формообразования зубчатых колес с незвольвентным профилем могут быть рассмотрены сборные долбяки с призматическими и круглыми фасонными резами (рис. 1, 2). Их достоинство заключается в том, что форма режущих кромок при переточках не искажается. Перемещение призматических резов на соответствующее расстояние или поворот круглых резов на соответствующий угол после каждой переточки компенсируют вызванное ею изменение положения фасонных режущих кромок относительно оси долбяка. Кроме того, предлагаемые сбор-

ные долбяки допускают в несколько раз большее количество переточек по сравнению с монолитным.

Профилирование сборных долбяков. Последовательность профилирования сборных долбяков определяется тем, что долбяк как обкаточный инструмент есть совокупность фасонных резов (копирующих по отношению к инструментальной поверхности и касающихся по отношению к формообразуемой поверхности зубчатого колеса) [1, 2].

Первый этап профилирования сборных долбяков состоит в нахождении инструментальной поверхности как огибающей. Боковые поверхности зубьев обрабатываемого колеса и инструментальная поверхность режущего инструмента являются фасонными цилиндрическими, они расположены в реперах $x_1y_1z_1$ и $x_2y_2z_2$ (рис. 1, 2).

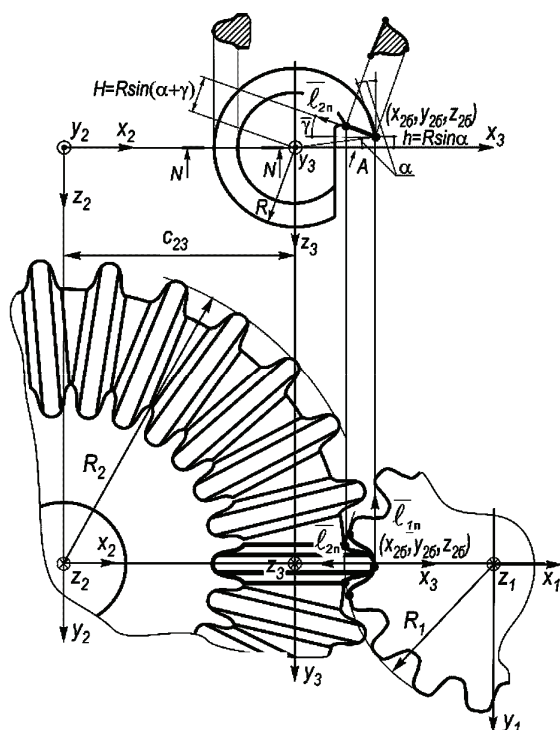


Рисунок 1 - К расчету профиля сборного долбяка с призматическими фасонными резами

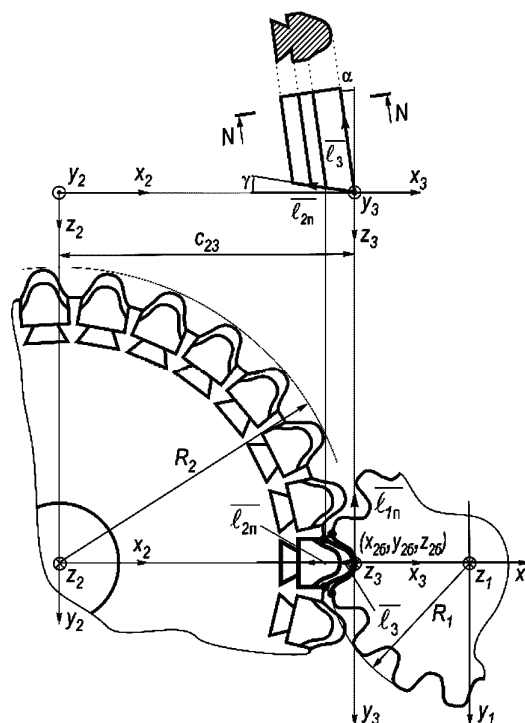


Рисунок 2 - К расчету профиля сборного долбяка с круглыми фасонными резами

Исходной информацией на первом этапе являются координаты точек профиля обрабатываемого колеса $x_{1К}$, $y_{1К}$ в репере колеса $x_1y_1z_1$ и наибольший радиус инструментального производящего колеса R_2 . Искомыми являются координаты точек профиля инструментальной поверхности $x_{1и}$, $y_{1и}$ в репере долбяка $x_2y_2z_2$.

Для нахождения профиля инструментальной поверхности, сопряженного с заданным профилем обрабатываемого колеса, может быть использован алгоритм расчета огибающих поверхностей для обкаточных инструментов и обрабатываемых зубчатых колес [3].

Второй этап профилирования сборных долбяков состоит в нахождении фасонной режущей кромки как

линии пересечения инструментальной и передней поверхностей. Исходная информация представляет собой координаты точек профиля цилиндрической инструментальной поверхности в репере долбяка $x_2y_2z_2$ и передний угол резца γ . Искомыми являются координаты фасонной режущей кромки в репере резца $x_3y_3z_3$.

Цилиндрическая инструментальная поверхность образуется действием оператора параллельного переноса \bar{l} на ее профиль. В репере долбяка $x_2y_2z_2$ ее уравнение имеет следующую операторную и матричную записи с параметром \bar{l} :

$$\bar{r}_2 = \bar{r}_{2и} + \bar{l}, \quad (1)$$

$$m_{r_2} = m_{r_{2и}} + m_{\bar{l}}, \quad (2)$$

где

$$m_{r_2} = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ x_2 \end{pmatrix}; m_{r_{2H}} = \begin{pmatrix} x_{2H} \\ y_{2H} \\ x_{2H} \end{pmatrix}; m_\ell = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\ell \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Передняя поверхность (плоскость) образуется действием двух операторов параллельного переноса $\bar{\ell}_1$ и $\bar{\ell}_2$ на базовую точку режущей кромки с координатами x_{26} , y_{26} , z_{26} [2]. Направив векторы переносов так, как показано на рисунке, запишем операторное и матричное уравнение передней плоскости в репере долбяка $x_2y_2z_2$ с параметрами ℓ_1 и ℓ_2 :

$$\bar{r}_2 = \bar{r}_{26} + \bar{\ell}_1 + \bar{\ell}_2, \quad (4)$$

$$m_{r_2} = m_{r_{26}} + m_{\ell_1} + m_{\ell_2}, \quad (5)$$

где

$$m_{r_{26}} = \begin{pmatrix} x_{26} \\ y_{26} \\ z_{26} \end{pmatrix}; m_{\ell_1} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\ell_1 \\ 0 \end{pmatrix}; m_{\ell_2} = \begin{pmatrix} -\ell_2 \cos \gamma \\ 0 \\ -\ell_2 \sin \gamma \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Для сборного долбяка с призматическими фасонными резами

$$x_{26} = c_{23} = R_2; \quad y_{26} = 0; \quad z_{26} = 0, \quad (7)$$

а для сборного долбяка с круглыми фасонными резами

$$x_{26} = -c_{23} - R \cos \alpha; \quad y_{26} = 0; \quad z_{26} = -R \sin \alpha, \quad (8)$$

где c_{23} – межцентровое расстояние реперов $x_2y_2z_2$ и $x_3y_3z_3$, α – задний угол реза, R – наибольший радиус реза.

Приравняв правые части уравнений (2) и (5), получаем условие пересечения инструментальной и передней поверхностей в матричной записи:

$$m_{r_{2H}} + m_\ell = m_{r_{26}} + m_{\ell_1} + m_{\ell_2}. \quad (9)$$

Это условие включает три уравнения с параметрами инструментальной и передней поверхностей. Их решение дает возможность определить неизвестные параметры ℓ , ℓ_1 , ℓ_2 , а затем с помощью уравнения (5) определить координаты точек режущей кромки X_2 , Y_2 , Z_2 в репере долбяка $x_2y_2z_2$.

Для выполнения следующего этапа профилирования необходимо координаты точек фасонной режущей кромки записать в репере реза $x_3y_3z_3$.

Операторное и матричное уравнения перехода от репера долбяка $x_2y_2z_2$ к реперу реза $x_3y_3z_3$ с помощью координатного оператора \bar{c}_{23} записываются следующим образом:

$$\bar{r}_{3PK} = \bar{r}_{2PK} + \bar{c}_{23}, \quad (10)$$

$$m_{r_{3PK}} = m_{r_{2PK}} + m_{c_{23}}, \quad (11)$$

где

$$m_{r_{3PK}} = \begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix}; m_{r_{2PK}} = \begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix}; m_{c_{23}} = \begin{pmatrix} -c_{23} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Третий этап профилирования сборных долбяков заключается в аналитическом описании фасонной задней поверхности вращения в репере реза и нахождение профиля этой поверхности в нормальном сечении. Исходной информацией на этом этапе являются

координаты точек фасонной режущей кромки, задний угол реза α , а также наибольший радиус R для круглого фасонного реза.

Цилиндрическая задняя поверхность призматического фасонного реза может быть образована действием оператора параллельного переноса $\bar{\ell}$ на фасонную режущую кромку [2]. Ее уравнения в операторной и матричной записи имеют следующий вид:

$$\bar{r}_3 = \bar{r}_{3PK} + \bar{\ell}_3, \quad (13)$$

$$m_{r_3} = m_{r_{3PK}} + m_{\ell_3}, \quad (14)$$

где

$$m_{\ell_3} = \begin{pmatrix} -\ell_3 \sin \alpha \\ 0 \\ -\ell_3 \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Задняя поверхность круглого фасонного реза может быть образована действием оператора вращения $\bar{\varphi}$ на фасонную режущую кромку [2]. Ее уравнения в операторной и матричной записи имеют следующий вид:

$$\bar{r}_3 = \bar{\varphi} \cdot r_{3PK}, \quad (16)$$

$$m_{r_3} = m_\varphi \cdot m_{r_{3PK}}, \quad (17)$$

где

$$m_\varphi = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Проведем осевую плоскость нормального сечения N-N. Ее операторное и матричное уравнения с параметрами x_{3H} и u_{3H} в репере реза $x_3y_3z_3$ записываются в следующем виде:

$$\bar{r}_3 = \bar{r}_{3H}, \quad (19)$$

$$m_{r_3} = m_{r_{3H}}, \quad (20)$$

где

$$m_{r_{3H}} = \begin{pmatrix} x_{3H} \\ y_{3H} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Приравняв правые части уравнений (14) и (20) получим условие пересечения задней поверхности призматического фасонного реза и плоскости нормального сечения в матричной записи:

$$m_{r_{3PK}} + m_{\ell_3} = m_{r_{3H}}. \quad (22)$$

Это условие включает три уравнения с параметрами задней поверхности и плоскости нормального сечения. Их решение позволяет определить неизвестные параметры ℓ_3 , x_{3H} и u_{3H} и связанный с x_{3H} параметр z_{3H} и таким образом найти координаты точек искомого профиля задней поверхности призматического фасонного реза в нормальном сечении.

Приравняв правые части уравнений (17) и (20) получим условие пересечения задней поверхности круглого фасонного реза и плоскости нормального сечения в матричной записи:

$$m_\varphi \cdot m_{r_{3PK}} = m_{r_{3H}}. \quad (23)$$

Оно включает три уравнения с параметрами зад-

ней поверхности и плоскости нормального сечения. Их решение позволяет определить неизвестные параметры φ , $x_{3н}$, и $u_{3н}$ и таким образом найти координаты точек искомого профиля задней поверхности круглого фасонного резца в нормальном сечении.

Исследования физико-механической модели долбяка с целью замены цельной конструкции на сборную. На базе полученной системы уравнений создана геометрическая и конечно-элементная модели с учетом физико-механических свойств инструмента, которая послужила основой для прочностного анализа и теплообмена при обработке (рис 3).

На первом этапе исследований определялась адекватность конечно-элементной модели для формообразующего элемента от точности воспроизведения на ней граничных условий, нагрузок, геометрии и свойств материала. Выполнены исследования и определены суммарные перемещения, эквивалентные деформации по критерию Мизеса и эквивалентные напряжения по критерию Мизеса при приложении

давления по нормали к поверхности, равнодействующая которого равна 8000 Н (~800 кг) для материалов из группы быстрорежущих сталей (рис. 4, 5).

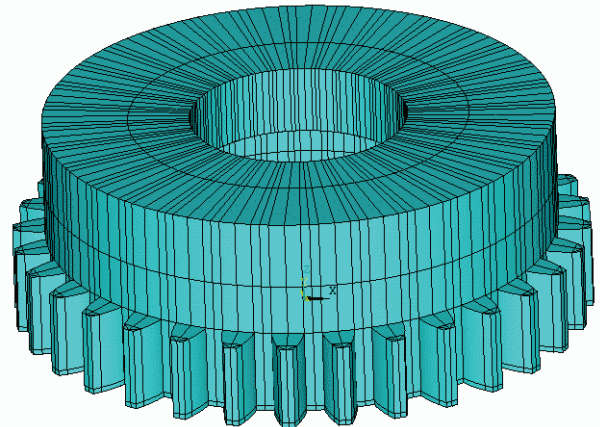


Рисунок 3 - Геометрическая модель долбяка с выделенными площадками для приложения нагрузки на зуб

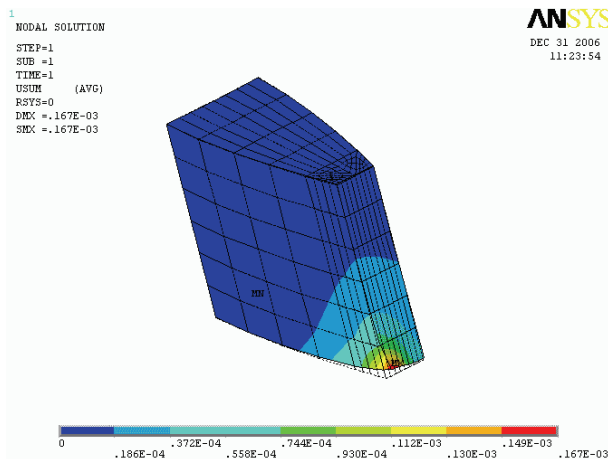


Рисунок 4 - Суммарные перемещения [м]

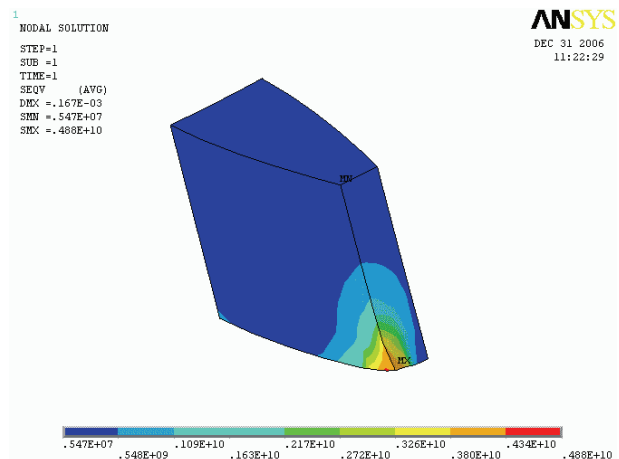


Рисунок 5 - Эквивалентные напряжения по критерию Мизеса [Па]

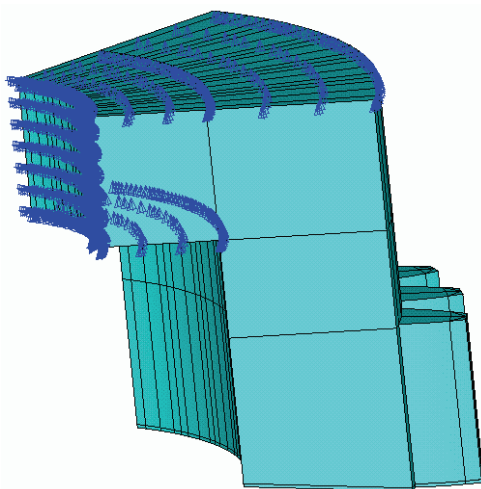


Рисунок 6 - Геометрическая модель сектора долбяка и граничные условия

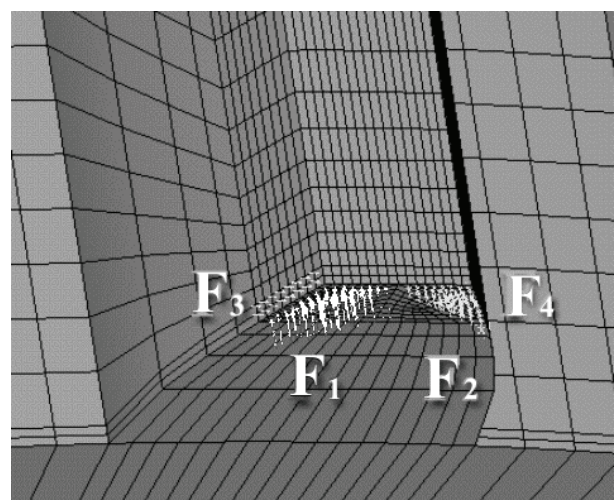


Рисунок 7 - Конечно-элементная модель долбяка и нагрузки

Максимальные эквивалентные напряжения по критерию Мизеса, рассчитанные с усреднением по

узловым значениям, составили $\sigma = 5550$ МПа.

Данная расчетная модель не точна, т.к. приводит

к завышению жесткости по сравнению с реальностью а значит и к возникновению погрешности. Приложенные распределенной нагрузки по поверхности позволяет снизить погрешность, возникающую при приложении эквивалентной силы. Вместе с этим направленные распределенной нагрузки должно совпадать с осью цилиндрических поверхностей.

С учетом проведенных расчетов и дополнительного анализа разработана секторная модель, вклю-

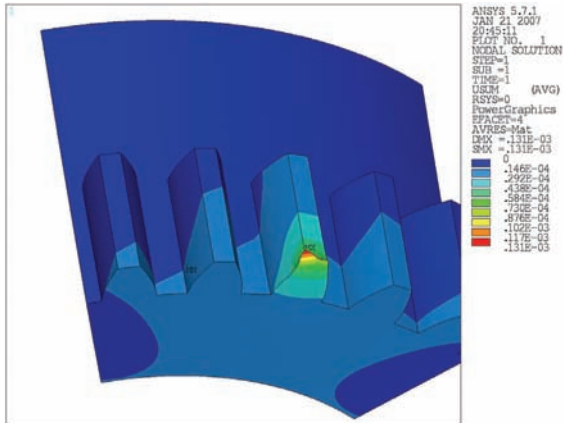


Рисунок 8 - Уточненное значение суммарных перемещений [м]

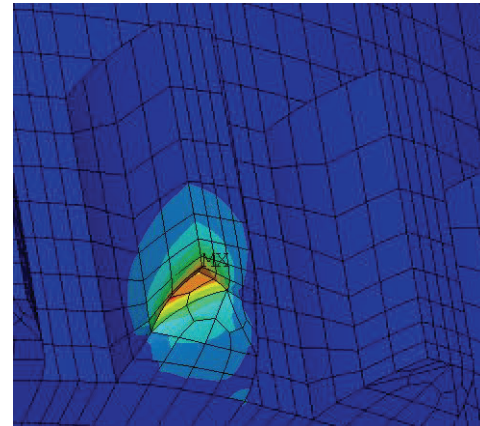


Рисунок 9 - Уточненное значение эквивалентных напряжений по критерию Мизеса [Па]

Таблица 1 – Уточненный массив значений

N зуба	F1 [МПа]	F2 [МПа]	F3 [МПа]	F4 [МПа]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	σ [МПа]
1	4000	-	-	-	618	-	-	3720
2	4000	-	2000	-	611	-	314	3760
3	4000	3000	2000	-	615	408	308	3800

Выводы. Результатом проведенных исследований являются оптимизированная геометрическая и имитационная конечно-элементная модели долбяка, учитывающие физико-механические свойства, на базе которых возможно рекомендовать материал и геометрические параметры режущих элементов для сборного инструмента.

Список литературы

1. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П.Р. Родин. – К.: Вища школа, 1977. – 192 с.
2. Перепелица Б.А. Разработка теории формообразования поверхностей резанием и режущих инструментов с помощью отображений аффинного пространства / Б.А. Перепелица. Дисс.... д-ра техн. наук. – Тула, 1981. – 359 с.
3. Кондусова Е.Б. Алгоритм расчета профиля огибающих поверхностей для обкаточных инструментов и деталей / Е.Б. Кондусова, Т.Е. Третьяк, А.В. Кривошея // Труды пятой международной конференции «Новые технологии в маши-

ностроении»: Proceeding Fifth International Conference «New Leading – Edge Technologies in Machinebuilding», Rubachie, Ukraine, September 18-21, 1996. – С. 140-141.

чающая пять зубьев (рис. 6), схему закрепления и распределенную нагрузку (рис. 7).
Проведена серия экспериментов (рис. 8, 9) и получен уточненный массив значений (табл. 1), позволяющий сделать выводы по прочностному анализу обкаточного зуборезного инструмента и изменению параметров при увеличении контактных площадок, что соответствует притуплению инструмента.

ностроении»: Proceeding Fifth International Conference «New Leading – Edge Technologies in Machinebuilding», Rubachie, Ukraine, September 18-21, 1996. – С. 140-141.

References (transliterated)

1. Rodin P.R. Osnovy formoobrazovaniya poverhnostej rezaniem. Kyiv: Vischa shkola, 1977. 192 p.
2. Perepelica B.A. Razrabotka teorii formoobrazovaniya poverhnostej rezaniem i rezhushchih instrumentov s pomosh'yu otobrazhenij affinnogo prostranstva. Diss.... doctor techn. nauk. Tula, 1981. 359 p.
3. Kondusova E.B., Tretyak T.E., Krivosheya A.V. Algoritm rascheta profilya ogibayuschih poverhnostej dlya obkatочnyh instrumentov i detalej. Trudy pyatoy mezhdunarodnoj konferencii "Novye tehnologii v mashinostroenii": Proceeding Fifth International Conference "New Leading – Edge Technologies in Machinebuilding", Rubachie, Ukraine, September 18-21, 1996. P. 140-141.

Надійшла (received) 30.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мартиненко Геннадій Юрійович (Мартыненко Геннадий Юрьевич, Martynenko Gennadii Yuriyovych) – кандидат технічних наук; доцент; кафедра «Динаміка і міцність машин»; НТУ «ХПІ»; тел.: +38(057) 707-68-79; e-mail: gmartynenko@ukr.net.

Мироненко Сергій Олександрович (Мироненко Сергей Александрович, Mironenko Sergej Aleksandrovich) – студент, гр. КІТ266, НТУ «ХПІ»; e-mail: serglprime@gmail.com

Третьяк Тетяна Євгенівна (Третьяк Татьяна Евгеньевна, Tretyak Tat'yana Evgen'evna) – старший викладач, кафедра ІТМ, НТУ «ХПІ»; тел. (057) 707-66-49, e-mail: tretyak.t.e@gmail.com