

DOI: 10.34220/2311-8873-2022-3-12



УДК 621.9

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

CAE МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОРЕБРЕННЫХ СТРУКТУР, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ

Зубков Николай Николаевич

д.т.н., проф. кафедры инструментальная техника и технологии МГТУ им. Н.Э. Баумана (РФ)

✉¹ **Цуканов Денис Валерьевич**

аспирант кафедры инструментальная техника и технологии МГТУ им. Н.Э. Баумана (РФ),
e-mail: d.tsukanov.inc@gmail.com

Бузаев Дмитрий Александрович

аспирант кафедры инструментальная техника и технологии МГТУ им. Н.Э. Баумана (РФ)

Битюцкая Юлия Леонидовна

к.т.н., инженер отдела разработки ООО "НОВАТЭРА" (РФ)

Аннотация. Представлен сравнительный анализ моделирования методом конечных элементов процесса и результатов деформирующего резания при получении оребрения на плоскостях. Приводится сравнение точности геометрических параметров макрорельефа, получаемого обработкой деформирующим резанием в инженерных программах DEFORM-3D, AdvantEdge и QForm. Результаты моделирования сравнивались с реально получаемым оребрением и аналитическими зависимостями расчета их геометрических параметров. Описаны особенности использования рассмотренных программ для прогнозирования параметров макрорельефа в виде оребрения для его использования в устройствах различного функционального назначения.

Ключевые слова: CAE, DEFORM-3D, ADVANTEDGE, QFORM, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ДЕФОРМИРУЮЩЕЕ РЕЗАНИЕ, ОРЕБРЕНИЕ, МАКРОРЕЛЬЕФ.

CAE SIMULATION OF THE FORMATION OF FINNED STRUCTURES PRODUCED BY THE DEFORMATIONAL CUTTING METHOD

Zubkov Nikolai Nikolaevich

doctor of tech. sc., professor of the department of Tool Technics of the Bauman Moscow State Technical University (RF)

✉¹ **Cukanov Denis Valerevich**

postgraduate student of the department of Tool Technics of the Bauman Moscow State Technical University (RF),
e-mail: d.tsukanov.inc@gmail.com

Buzaev Dmitrii Aleksandrovich

postgraduate student of the department of Tool Technics of the Bauman Moscow State Technical University (RF)

Bityuckaya Yuliya Leonidovna

cand. of tech. sc., engineer of the development department "NOVATERA" LLC (RF)

Annotation. Presented comparative analysis of the finite element simulation of the process and the results of deformational cutting when obtaining fins on the planes. A comparison is made of the accuracy of the geometric parameters of the macrorelief obtained by processing by deformational cutting in the engineering programs DEFORM-3D, AdvantEdge and QForm. The simulation results were compared with the actually obtained fins and the analytical dependences of the calculation of their geometric parameters. The features of using the considered programs for predicting the parameters of the macrorelief in the form of ribbing for its use in devices of various functional purposes are described.

Keywords: CAE, DEFORM-3D, ADVANTEDGE, QFORM, SIMULATION, DEFORMATIONAL CUTTING, FINNING, MACRORELIEF.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Деформирующее резание (ДР) является видом лезвийно-деформирующей обработки, позволяющей формировать на поверхности детали макро- или микрорельеф в виде чередующихся выступов и впадин без отделения стружки [1]. Путем варьирования геометрических параметров инструмента и режимов обработки возможно получение требуемого шага, высоты и наклона выступов [2]. Подобные рельефные структуры находят применение в теплообменных аппаратах [3], могут служить в качестве матриц для композиционных износостойких смазывающих покрытий [4]. Перераспределение материала при деформирующем резании использовалось для восстановления размеров изношенных деталей машин, а энергия, выделяемая в зоне деформирующего резания, позволяет использовать метод для поверхностной закалки заготовки на токарном оборудовании [5]. Обработка листовых заготовок с двух сторон методом ДР позволяет получать микро- и макросетки [6].

Знание формы и реальных геометрических параметров оребрения необходимо при оценке теплогидравлических характеристик теплообменных деталей, получаемых ДР. При сквозном оребрении, при производстве щелевых фильтрующих труб и фильтрующих сеток ширина межреберного зазора полностью определяет такую эксплуатационную характеристику как тонкость фильтрации. Ширина межреберного зазора определяет также капиллярный напор и вместе с высотой зазора определяет гидравлическое сопротивление фитилей тепловых труб, получаемых ДР. Для самосмазывающихся узлов трения, получаемых внедрением твердосмазочных материалов в оребренные структуры, важным является знание величины удаляемого треугольного заострения ребра.

Существуют теоретические зависимости, позволяющие прогнозировать некоторые геометрические параметры получаемого в результате ДР макрорельефа, однако реальная форма и размер ребер имеют отличия от геометрической идеализации [7]: имеют место отклонение боковых сторон ребер от прямолинейности и вертикальности, непостоянство толщины ребра и межреберного зазора, – что в ряде случаев оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики получаемых структур.

Процесс деформирующего резания является многофакторным. Результат обработки зависит не только от свойств обрабатываемого материала. Варьирование как технологических параметров ДР (глубина резания и величина подачи инструмента), так и геометрических параметров инструмента, оказывает влияние на форму и размеры получаемых элементов рельефа. Несомненно, экспериментальный метод установления всех геометрических параметров макрорельефа в зависимости от конкретных условий обработки является самым точным, однако это сопряжено со значительными материальными и трудовыми затратами как на этапе получения экспериментальных образцов, так и на этапе измерения геометрических параметров полученного макрорельефа.

Задачу по определению формы макрорельефа возможно решить в современных инженерных САЕ программах посредством компьютерного моделирования процесса резания на основе метода конечных элементов. [8, 9]. Моделирование позволяет существенно сократить объем экспериментов для каждого конкретного варианта использования метода ДР. В настоящее время существует большое количество программных средств конечно-элементного анализа, как специализированных в области моделирования технологических процессов [10], так и универсальных, способных решать различные инженерные задачи, например, такие системы как ABAQUS [11, 12], LS-DYNA [13] ANSYS [14], AUTODYN и другие. [8]. Каждая система обладает своими преимуществами и недостатками.

В статье рассматривается процесс моделирования процесса ДР, а также формы и размеров получаемого макрорельефа в специализированных инженерных программах таких как DEFORM-3D, AdvantEdge, QForm. Оценка точности моделирования производилась сравнением с экспериментальными данными. Если программа AdvantEdge предназначена для моделирования процессов резания, то программы DEFORM-3D и QForm предназначены для моделирования процессов пластического деформирования. Однако, ДР является комбиниро-

ванном процессом обработки. Он основан как на образовании новых поверхностей, характерных для процессов резания так и на пластическом деформировании в условиях высоких степеней деформации, при этом отделения стружки не происходит. В статье предложено использовать программы моделирования процессов обработки давлением для моделирования процесса ДР и оценить адекватность их применения. Deform 3D – инженерный программный комплекс, основным назначением которого является моделирование технологических процессов обработки металлов давлением. DEFORM 3D – это неявный решатель, использующий технику Ньютона-Рафсона, который позволяет использовать типы элементов тетраэдр (3D) и прямоугольник (2D). [15].

AdvantEdge – программа, специализированная в области моделирования механической обработки резанием [8]. Расчет динамического равновесия проводится посредством явного метода интегрирования по времени при использовании метода конечных элементов Лагранжа [16] с повторным адаптивным созданием сетки. Подобный подход к моделированию позволяет устранять нелинейности, которые могут возникать из-за высоких пластических деформаций и высокой скорости деформации. В качестве модели материала используется степенной закон для описания деформационного упрочнения и влияния скорости деформации, а для расчета термического влияния используется полиномиальная функция пятого порядка [17].

QForm – программа российской разработки, специализированная для расчета технологических процессов при больших пластических деформациях. Программное обеспечение QForm позволяет моделировать холодные и горячие процессы обработки металлов давлением: штамповку, свободную ковку, выдавливание, прокатку, штамповку, гибку, экструзию профилей и другие специальные процессы [18, 19]. Визуализация процессов формоизменения происходит одновременно с расчетом, что позволяет в режиме реального времени интерпретировать получаемые результаты и вносить в технологию необходимые изменения.

2 Материалы и методы

Проверка адекватности полученных моделированием геометрических параметров оребрения проводилась их сравнением с реально полученным оребрением на образцах.

Общими этапами при моделировании во всех рассматриваемых программах были: проектирование геометрии режущего инструмента и заготовки, расположение созданных объектов в пространстве относительно друг друга, выбор инструментального материала и материала заготовки, выбор режимов ДР (глубина резания, подача, скорость резания).

Моделировалось ДР при обработке хромоникелевой стали аустенитного класса 08X18H10T и меди М1.

Геометрические параметры инструмента для моделирования составляли: главный угол в плане $\varphi = 37,8^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 90^\circ$. Главный и вспомогательный задний углы были равны и составляли $\alpha = \alpha_1 = 3^\circ$. Для уменьшения машинного времени в симуляции использован не полноразмерный резец ДР, а только участок режущего клина резца, непосредственно участвующий в процессе резания и деформирования подрезанного слоя.

Для процесса моделирования во всех программах были приняты одинаковые граничные условия. Резец моделировался как упругое тело; заготовка – деформируемое. Фиксация инструмента и заготовки осуществлялась по плоскостям, указанным на рисунке 1, ограничение перемещения в данных плоскостях накладывалось по осям XYZ (обозначено штриховкой).

В процессе моделирования использование смазочно-охлаждающих жидкостей не предусматривалось. Коэффициент трения между резцом и заготовкой принимался равным 0,5. Во всех рассматриваемых инженерных программах использовался единый минимальный размер конечно-элементной сетки, которой составлял 1/10 от глубины резания.

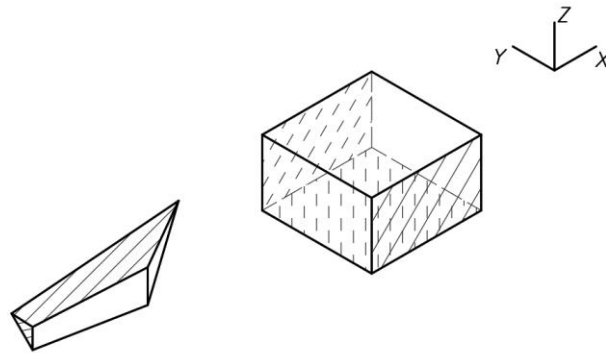
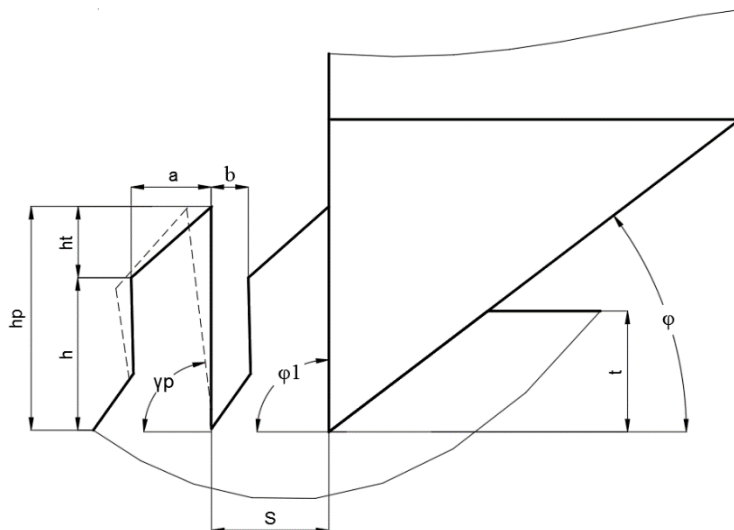


Рисунок 1 – Схема граничных условий при моделировании

Процесс моделирования деформирующего резания осуществлялся для получения оребрения на плоскости при операции строгания, на каждом исследуемом материале при постоянной скорости резания $V_{рез} = 1 м/с$. Для оценки влияния масштабного фактора моделирование проводилось при удвоении величины подачи, при этом глубина резания принималась равной величине подачи инструмента на двойной ход: $t_1 = S_1 = 0,2$ мм; $t_2 = S_2 = 0,4$ мм; $t_3 = S_3 = 0,8$ мм.

Сравнение результатов моделирования проводили для случая с поперечными срезами оребрения, полученного при обработке ДР на поперечно-строгальном станке модели 7307, на режимах резания и с помощью инструмента, используемых при моделировании. Обработка проводилась резцом из твердого сплава H10F (Sandvik Coromant), заточенным алмазным чашечным кругом с геометрическими параметрами, указанными выше, в трехповоротном приспособлении на универсально-заточном станке модели 3М642.

При моделировании и на реальных поперечных срезах оребрения фиксировались следующие параметры макрорельефа (рис. 2):



h – высота ребра без треугольной вершины,
 h_p – полная высота ребра,
 h_t – высота треугольного заострения ребра,
 b – ширина межреберного зазора, γ_p – угол наклона ребра, измеряемый по отношению к обрабатываемой поверхности, a – толщина формируемого ребра

Рисунок 2 – Параметры оребрения, получаемого ДР

Исследование геометрических параметров материалов после ДР проводили на подготовленных шлифах на оптическом микроскопе Olympus GX-51.

Сравнение проводилось также с теоретическими зависимостями получаемого ДР оребрения по следующим формулам [7].

Толщина формируемого ребра (a):

$$a = S_0 \cdot \sin \varphi. \quad (1)$$

Полная высота ребра (h_p):

$$h_p = t / \sin \varphi + 0,5S_0 \cdot \cos \varphi. \quad (2)$$

Ширина межреберного зазора b :

$$b = S \cdot (\sin \varphi_1 - \sin \varphi). \quad (3)$$

Угол наклона ребра γ_p :

$$\gamma_p = \varphi. \quad (4)$$

Теоретические зависимости не учитывают переменность толщины ребра по высоте, отклонение заострения вершины ребра от треугольного и отклонение наклона ребра от угла отгибки, равного вспомогательному углу инструмента в плане $\varphi_1 = 90^\circ$.

3 Результаты исследований

В процессе моделирования было выявлено, что использование модели заготовки с предварительно сформированной поверхностью резания (рис. 3), приводит к существенно отличающейся форме смоделированного ребра по сравнению со шлифами (рис. 4).

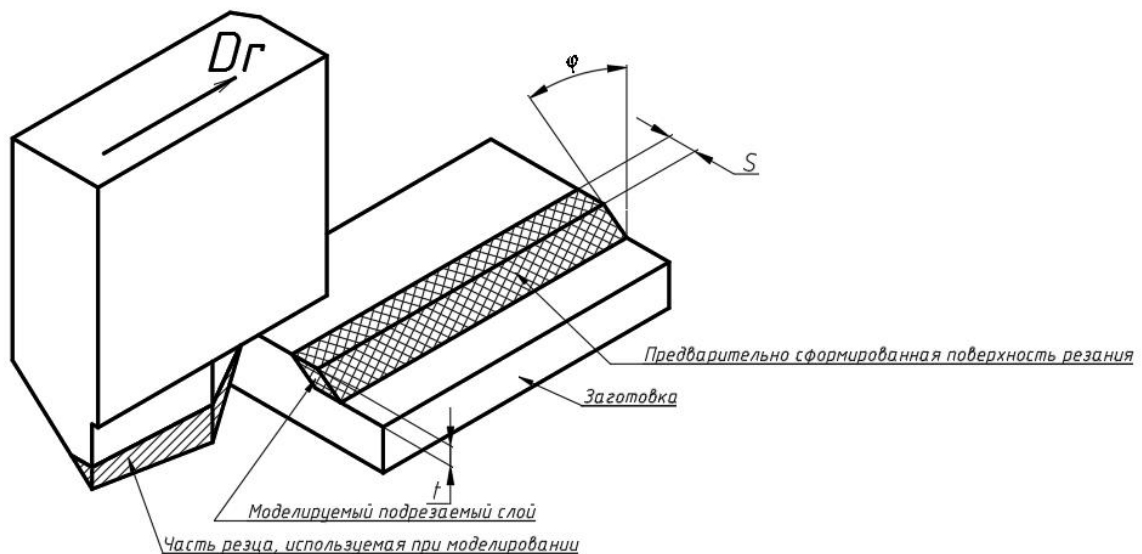


Рисунок 3 – Схема для моделирования одного прохода инструментом для ДР заготовки с предварительно сформированной поверхностью резания

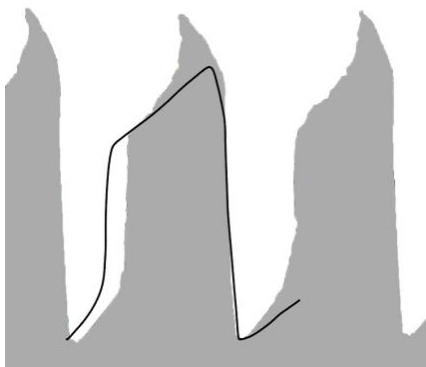
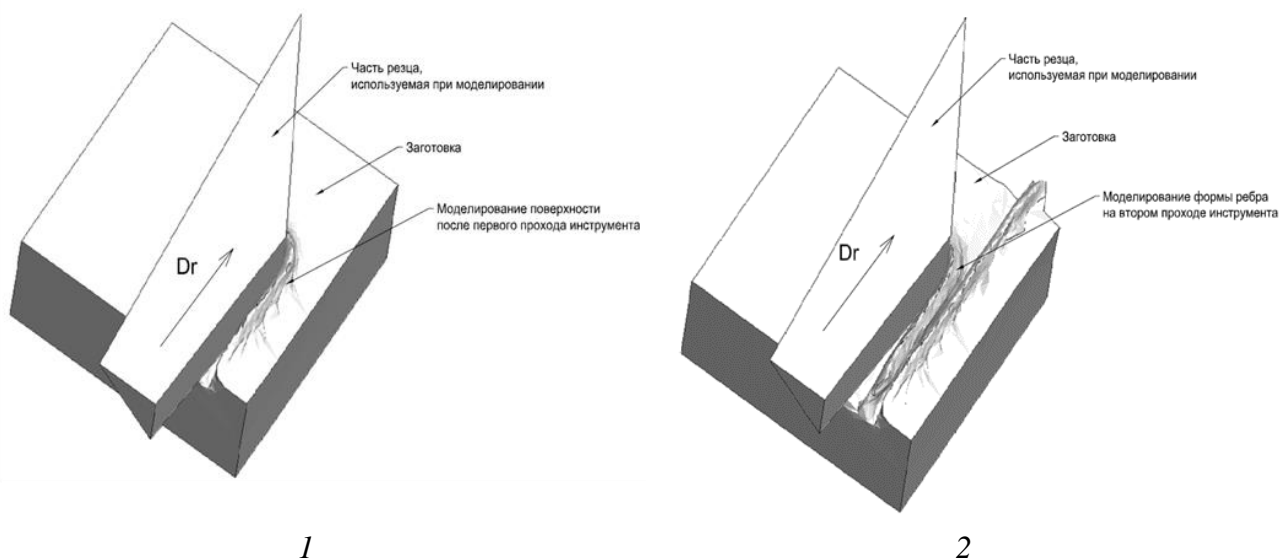


Рисунок 4 – Сравнение реального профиля оребрения (серый фон) и получаемого в программе DEFORM-3D (черная линия) при использовании модели заготовки с уже сформированной поверхностью резания

Было высказано предположение, что неудовлетворительные результаты моделирования вызваны отсутствием учета воздействия инструмента на материал заготовки при его предыдущем проходе.

Моделирование формы ребра, полученного не на первом, а на втором проходе инструмента показало более адекватное совпадение с реальным профилем оребрения. Все дальнейшие варианты моделирования проводились именно при двухпроходном процессе ДР (рис. 5).



1 – формирование поверхности при первом проходе инструмента;
2 – моделирование формы ребра на втором проходе инструмента

Рисунок 5 – Моделирование формы ребра в AdvantEdge

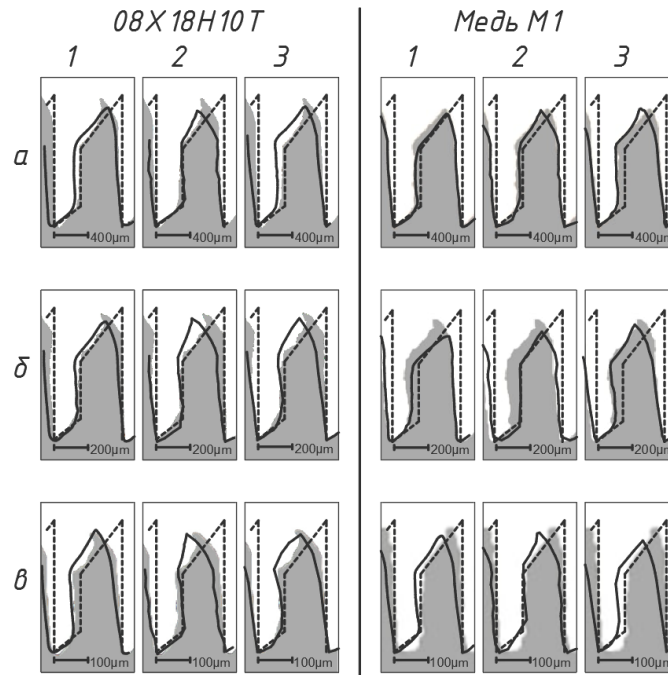
Профили получаемых ребер на стали и меди при моделировании в трех используемых инженерных программах с наложением на них реального и теоретического профиля оребрения представлены на рисунке 6. Пунктирной линией отмечен теоретически профиль ребра, сплошной линией – результат моделирования, серым фоном наложен реальный профиль ребра, полученный по результатам эксперимента.

Сопоставленные измерения основных геометрических параметров макрорельефа приведены в таблице 1.

Моделирование процесса деформирующего резания во всех рассмотренных программах позволяет получить более достоверные геометрические параметры оребренной структуры, соответствующие экспериментальным данным, чем аналитический расчет. Расчетные данные полной высоты ребра h_p для всех исследуемых технологических параметров имеют завышенные значения.

Как видно из рисунка 6, ребра, реально полученные в эксперименте, не вертикальны. Все программы учитывают это отклонение. Наилучший результат по точности моделирования угла наклона ребра γ_p , получен в AdvantEdge: разница с экспериментальными данными не превышает 2 %. Также программы инженерного моделирования адекватно описывают реальную форму треугольного заострения ребра.

Анализ результатов, представленных в табл. 1, показывает, что наилучшую сходимость результатов моделирования с экспериментальными данными по ширине зазора (b) обеспечивают программы DEFORM-3D и QForm. Отклонение ширины межреберных зазоров от результатов эксперимента в DEFORM-3D не превышает 7 % для 08X18H10T, в QForm — 6 % для меди М1.



$a - S = t = 0,8$ мм; $b - S = t = 0,4$ мм; $v - S = t = 0,2$ мм;
 1 – DEFORM-3D; 2 – AdvantEdge; 3 – QForm

Рисунок 6 – Сравнение результатов моделирования (сплошная линия) с теоретическим (пунктирная линия) и реальным профилем оребрения (серый фон)

Таблица 1 – Сравнение результатов моделирования

		08X18H10T	Медь М1	08X18H10T	Медь М1	08X18H10T	Медь М1
		$t = S = 0,8$ мм		$t = S = 0,4$ мм		$t = S = 0,2$ мм	
b , мм	Теория	0,31		0,16		0,08	
	Эксперимент	0,35	0,27	0,16	0,14	0,07	0,07
	AdvantEdge	0,37	0,34	0,17	0,18	0,1	0,09
	DEFORM-3D	0,3	0,3	0,15	0,15	0,07	0,08
	QForm	0,31	0,3	0,18	0,15	0,09	0,07
h_p , мм	Теория	1,56		0,77		0,39	
	Эксперимент	1,51	1,42	0,74	0,71	0,36	0,36
	AdvantEdge	1,35	1,39	0,72	0,66	0,35	0,35
	DEFORM-3D	1,37	1,31	0,7	0,62	0,36	0,34
	QForm	1,39	1,39	0,71	0,68	0,34	0,33
h , мм	Теория	0,91		0,46		0,23	
	Эксперимент	0,95	0,98	0,51	0,47	0,24	0,27
	AdvantEdge	0,97	1,01	0,49	0,46	0,25	0,25
	DEFORM-3D	0,97	0,91	0,47	0,43	0,24	0,23
	QForm	0,99	0,96	0,48	0,45	0,24	0,2
γ_p , град.	Теория	90		90		90	
	Эксперимент	87,5	86	88,6	86	85,9	86
	AdvantEdge	85,8	86,5	84,6	86	83,7	86
	DEFORM-3D	85,7	86	85,7	86,5	82	84
	QForm	83,4	83	83,4	82	82,7	82,5

Расхождение с результатами эксперимента полной высоты ребра (h_p) в AdvantEdge и QForm составило не более 5 %.

Отклонение высоты ребра без учета треугольного заострения его вершины (h) в AdvantEdge по сравнению с экспериментальными данными составило менее 4 %.

4 Обсуждение и заключение

Использование всех рассмотренных инженерных программ моделирования формы и геометрических параметров оребрения, получаемого методом деформирующего резания, показало значительно большее соответствие с реально получаемым оребрением по сравнению с ранее используемыми аналитическими зависимостями.

Моделирование геометрических параметров оребренных структур для решения задач в области теплообмена рекомендуется проводить в программах AdvantEdge и QForm, поскольку эти программы показали высокую точность моделирования полной высоты ребра, геометрической формы ребра и его треугольного заострения.

Высокая точность моделирования высоты ребра без учета треугольного заострения позволяет рекомендовать использование программы AdvantEdge для моделирования макрорельефа при использовании ДР в технологии восстановления размеров изношенных деталей машин, а также при создании самосмазывающихся узлов трения скольжения при размещении твердосмазочных материалов в межреберном зазоре с последующим удалением заостренных вершин ребер.

Наибольшая точность по моделированию получаемой ширины межреберного зазора получена в программах DEFORM-3D и QForm, что позволяет рекомендовать использование этих программ при моделировании процесса ДР в области его использования при получении щелевых фильтрующих структур.

Список литературы

- 1 European Patent EP 0727269. Method of producing surfaces with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method. Zubkov N. N., Ovchinnikov A. I. Date of filing 27.04.1994, date of publication 21.08.96. – 36 p.
- 2 Зубков, Н. Н. Многофункциональная технология увеличения площади поверхности для повышения теплообменных и технологических свойств деталей // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2003. – № 3. – С. 41-46.
- 3 Зубков, Н. Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // Новости теплоснабжения. – 2005. – № 4. – С. 51-53.
- 4 Севальнёв, Г. С. и др. Повышение триботехнических характеристик аустенитной стали методом деформирующего резания // Металлург. – 2021. – № 2. – С. 42-47.
- 5 Zubkov N. et al. Steel case hardening using deformational cutting // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2018. – Т. 140. – № 6
- 6 Зубков, Н. Н. Растяжные титановые сетки на основе деформирующего резания // Обработка металлов : технология, оборудование, инструменты. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 41-53.
- 7 Зубков, Н. Н. Разработка и исследование метода деформирующего резания как способа формообразования развитых макрорельефов : дис. – Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2001.
- 8 Горбунов, И. В. и др. Особенности моделирования процессов механической обработки в САЕ-системах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 4-4. – С. 846-853.

- 9 Astakhov, V. P., Outeiro J. C. Metal cutting mechanics, finite element modelling // Machining. – Springer, London, 2008. – С. 1-27.
- 10 Outeiro J. C. et al. Evaluation of present numerical models for predicting metal cutting performance and residual stresses // Machining Science and Technology. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 183-216.
- 11 Zetterberg M. A. critical overview of machining simulations in ABAQUS. – 2014.
- 12 Кхалифа, М. Сравнительный анализ конечно элементных пакетов ABAQUS и ANSYS WORKBENCH при моделировании процесса резания // Международная научно-техническая конференция молодых ученых. – 2020. – С. 2427-2431.
- 13 Криворучко, Д. В., Залого В. А. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы. – 2012.
- 14 Кхалифа, М. М., Дуюн Т. А. Моделирование процесса резания конструкционной стали с использованием конечно элементного пакета ANSYSWorkbench // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2019. – №. 11. – С. 121-127.
- 15 Liu C. et al. Benchmarking of several material constitutive models for tribology, wear, and other mechanical deformation simulations of Ti6Al4V // Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. – 2019. – Т. 97. – С. 126-137.
- 16 Man, X. et al. Validation of finite element cutting force prediction for end milling // Procedia CIRP. – 2012. – Т. 1. – С. 663-668.
- 17 Molaiekiya F. et al. Influence of process parameters on the cutting performance of SiAlON ceramic tools during high-speed dry face milling of hardened Inconel 718 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Т. 105. – № 1. – С. 1083-1098.
- 18 Биба. Н. В. и др. QForm-универсальная и эффективная программа для моделированияковки и штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – № 1. – С. 36-42.
- 19 Мышечкин, А. А., Шумило Е. А., Босикашвили И. Г. Разработка и совершенствование процесса горячего формообразования поковки «шестерня» моделированием в программе QFORM // Инновационные технологии в электронике и приборостроении. – 2021. – С. 155-159.

References

- 1 European Patent EP 0727269. Method of producing surfaces with alternating ridges and depressions and a tool for carrying out the said method. Zubkov N. N., Ovchinnikov A. I. Date of filing 27.04.1994, date of publication 21.08.96. – 36 p.
- 2 Zubkov N. N. Multifunctional technology for the parts surface area enlargement for heat transfer and processing characteristics enhancement // Polet [Flight]. – 2003. – № 3. – С. 41-46.
- 3 Zubkov, N., 2005. Orebrenie trub teploobmenny`x apparatov podrezaniem i otgibkoj poverxnostny`x sloev. Novosti teplosnabzheniya, 4, pp. 51-53.
- 4 Seval`nyov, G. S., Tsukanov, D. V., Zubkov, N. N., Dul`nev, K. V., & Seval`nyova, T. y. G. e. (2021). Improving tribotechnical characteristics of austenitic steel by deformational cutting. Metallurgist(2), 42-47.

- 5 Zubkov N. et al. Steel case hardening using deformational cutting // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2018. – Т. 140. – № 6
- 6 Zubkov, N. N. (2020). Expanded titanium meshes based on deformational cutting. *Obrabotka metallov*, 22(1), 41-53.
- 7 Zubkov, N. N. (2001). Razrabotka i issledovanie metoda deformiruyushhego rezaniya kak sposoba formoobrazovaniya razvity`x makrorel`efov. BMSTU.
- 8 Gorbunov, I. V., Efremkov, I. V. e., Leont`ev, V. L. e., & Gismetulin, A. b. R. (2013). Features of the simulation of machining processes in CAE-systems. *Izvestiya samarskogo nauchnogo centra rossijskoj akademii nauk*, 15(4-4), 846-853
- 9 Astakhov V. P., Outeiro J. C. Metal cutting mechanics, finite element modelling // *Machining*. – Springer, London, 2008. – С. 1-27.
- 10 Outeiro J. C. et al. Evaluation of present numerical models for predicting metal cutting performance and residual stresses // *Machining Science and Technology*. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 183-216.
- 11 Zetterberg M. A critical overview of machining simulations in ABAQUS. – 2014.
- 12 Kxalifa, M. (2020). Sravnitel`ny`j analiz konechnoe`lementny`x paketov ABAQUS I ANSYS WORKBENCH pri modelirovanii processa rezaniya. Paper presented at the Mezhdunarodnaya nauchno-texnicheskaya konferenciya molody`x ucheny`x.
- 13 Krivoruchko, D. V., & Zaloga, V. A. (2012). Modelirovanie processov rezaniya metodom konechny`x e`lementov: metodologicheskie osnovy`.
- 14 Khalifa, M., & Duyun, T. (2019). Finite element modeling of the cutting process during machining of structural steel using ansys workbench. *Vestnik Belgorod State Technological University V. G. Shukhov*(11), 121-127.
- 15 Liu C. et al. Benchmarking of several material constitutive models for tribology, wear, and other mechanical deformation simulations of Ti6Al4V // *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. – 2019. – Т. 97. – С. 126-137.
- 16 Man X. et al. Validation of finite element cutting force prediction for end milling // *Procedia CIRP*. – 2012. – Т. 1. – С. 663-668.
- 17 Molaiekiya F. et al. Influence of process parameters on the cutting performance of SiAlON ceramic tools during high-speed dry face milling of hardened Inconel 718 // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Т. 105. – №. 1. – С. 1083-1098.
- 18 Biba, N., Stebunov, S., Gladkov, Y., & Mordvincev, P. (2011). QForm-universal`naya i e`ffektivnaya programma dlya modelirovaniya kovki i shtampovki. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* (1), 36-42.
- 19 Myshechkin A. A., Shumilo E. A., Bosikashvili I. G. Development and improvement of the process of hot forming of the forging "gear" by modeling in the QFORM program // *Innovative technologies in electronics and instrumentation*. – 2021. – S. 155-159.