

УДК 621.9

DOI: 10.12737/article_59353e29743f65.13333985

Б.Я. Мокрицкий, А.В. Киричек, А.В. Морозова, Е.Б. Мокрицкая

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ СРЕД

Моделированием напряжений и деформаций твердосплавных концевых фрез получены усовершенствованные конструкции составных концевых фрез, обеспечивающие снижение доли инструментальных затрат в себестоимости изготавливаемых изделий без снижения качества и производительности в сравнении с монолитными твердосплавными фрезами.

Посредством моделирования процесса резания с помощью программных сред ANSYS (стан-

дартный модуль Workbench Explicit Dynamics), SolidWorks (модуль Simulation), SOLID164 исследованы поля напряжений, температур и деформаций элементов системы резания при обработке заготовок, выполненных из алюминиевого сплава, конструкционной стали, титанового сплава.

Ключевые слова: моделирование напряжений, моделирование деформаций, осевой инструмент, моделирование процесса резания, программная среда.

B.Ya. Mokritsky, A.V. Kirichek, A.V. Morozova, E.B. Mokritsky

INVESTIGATIONS OF CUTTING OPERATION PROCESS RESULTS ON BASIS OF MODELING USING SOFTWARE ENVIRONMENT

The purpose of investigations is a search of methods for the reduction of tool costs without quality decrease and decline of productivity by means of the modeling of a milling process with end milling cutters. By means of the simulation of a cutting process with the aid of software environment of ANSYS (standard module Workbench Explicit Dynamics), Solid Works (Simulation module), (SOLID 164) there are analyzed the fields of stresses, temperatures and deformations of elements of a cutting system at the machining of blanks made of aluminum alloy, structural steel, titanium alloy. Furthermore, by simulation of stresses and deformations of hard alloy end milling cutters there are ob-

tained updated designs of composite end mills ensuring decrease of the part of tool costs in the cost price of products manufactured without decrease of quality and efficiency in comparison with solid hard alloy milling cutters.

The simulation result have shown that with solid milling cutters can compete composite mills the price of which times lesser which is justified by further investigations.

Key words: simulation of stresses, simulation of deformations, axial tool, simulation of cutting process, software environment.

Введение

Управлять эффективностью процесса резания сложно в силу необходимости прогнозировать особенности условий его реализации. Проверять эффективность путём проведения натуральных пробных испытаний становится экономически невыгодно, так как стоимость одного станко-часа для современного оборудования высока. Ещё более остро стоит проблема оптимизации процесса резания для тех случаев, когда нет возможности провести даже столь дорогие испытания. Это характерно для случая, когда заготовка детали единственная и дорогостоящая, порча её при испытаниях приведет к срыву производст-

венного процесса и значительным финансовым потерям.

Сказанное аргументирует необходимость предварительного моделирования процесса резания в целях оптимизации как отдельных параметров, так и комплекса параметров процесса. Электронные модели специфичны тем, что позволяют численным методом воссоздать те или иные условия эксплуатации и оценить поведение системы при реализации процесса резания. Каждая модель строится под конкретную задачу. Чем более совершенной должна быть модель, тем более сложное программное обеспечение требуется для ее построения.

Ниже приведены некоторые примеры применения широкоуниверсального про-

Обсуждение полученных результатов

Вопросы моделирования процесса резания рассмотрены применительно к двум направлениям:

1. Разработка конкурентного металлорежущего инструмента;
2. Повышение эффективности стружкообразования.

Актуальность моделирования в связи с разработкой конкурентного металлорежущего инструмента состоит в следующем. Сложившаяся практика применения высокопроизводительных импортных металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением привела к бесконтрольному применению дорогостоящих монолитных (цельных) твердосплавных концевых фрез. В первую очередь они предназначены для обработки пазов и обнيزок в заготовках деталей, выполненных из труднообрабатываемых материалов. При этом подбор параметров режимов резания должен обеспечивать контролируемый износ режущих кромок фрезы. Тем не менее в практике часты случаи иного применения таких фрез, в

граммного продукта ANSYS для моделирования процесса резания.

том числе даже для обработки кромок алюминиевых листов, что можно выполнить значительно более дешёвыми фрезами. Погоня за производительностью обработки привела к чрезмерным инструментальным затратам в себестоимости изделий.

Результаты анализа отказов монолитных концевых твердосплавных фрез приведены на рис. 1. Половина инструмента скалывается по хвостовику или режущей части так, что он не пригоден для дальнейшего использования. Каковы бы ни были причины таких сколов, это недопустимо хотя бы потому, что влечёт за собой чрезмерные затраты. Это послужило причиной моделирования процесса фрезерования концевыми фрезами с целью сокращения инструментальных затрат без снижения качества и производительности обработки. Моделирование показало, что с монолитными фрезами могут успешно конкурировать составные фрезы, стоимость которых в разы меньше, что обосновывается дальнейшими исследованиями.



Рис. 1. Иллюстрация отказов монолитных концевых твердосплавных фрез при обработке заготовок деталей авиационного назначения: а - распределение фрез по видам отказов; б - превалирующий вид отказа сколом хвостовика по месту крепления фрезы в патроне

Актуальность моделирования в связи с повышением эффективности стружкообразования состоит в следующем. Сливная стружка при точении нежелательна по ряду причин. Тем более она недопустима при глубинах резания более 10 мм, когда стружка становится травмоопасной, плохо транспортируемой и т.д. Например, даже

ведущими в мире инструментальными фирмами не в полной мере решена задача дробления стружки при восстановительной обработке бывших в эксплуатации колёс железнодорожных вагонов точением тангенциальными режущими пластинами. Поэтому приходится либо снижать параметры режима резания, либо чрезмерно ус-

ложнять геометрию (топографию) передней поверхности режущего инструмента.

Моделирование напряженного состояния материала концевых фрез выполнено методом конечных элементов с целью поиска технических решений по новым конструкциям концевых фрез, позволяющим конкурировать с монолитными фрезами без снижения качества и производительности обработки и тем самым ограничить область применения монолитных фрез, а следовательно, снизить и инструментальные затраты. Для решения этой задачи целесообразно применение программного обеспечения SolidWorks (модуль Simulation).

Сравнительному исследованию подвергнуты электронные модели концевых твердосплавных фрез двух исполнений: монолитных (из твёрдого сплава марки ВК8) и составных, у которых режущая часть выполнена такой же, как у монолитных фрез, а сопряжённый с режущей частью хвостовик выполнен из конструкционной стали или иного материала. Хвостовик

Ниже показан пример прикладного характера.

и режущая часть соединены, например, пайкой. Сопряжение хвостовика и режущей части может быть различным в зависимости от необходимости передавать с хвостовика на режущую часть от шпинделя станка крутящий момент той или иной величины [1- 5]. При диаметре фрезы 16 мм длину хвостовика варьировали от 90 до 220 мм, число режущих зубьев - от 2 до 5; при длине режущей части фрезы 40 мм рассматривали возможность обработки вертикальной стенки (паза, кармана, обнизки) протяжённостью от 5 до 40 мм. Из всех составляющих силы резания в расчёте напряжений и деформаций корпуса фрезы учитывали только нормальную составляющую величиной 3000 Н.

На рис. 2 показан пример изображения распределения напряжений по длине фрезы и деформации корпуса фрезы в результате действия этих напряжений при длине фрезы 90 мм. Подобным образом получены картины для фрез других длин.

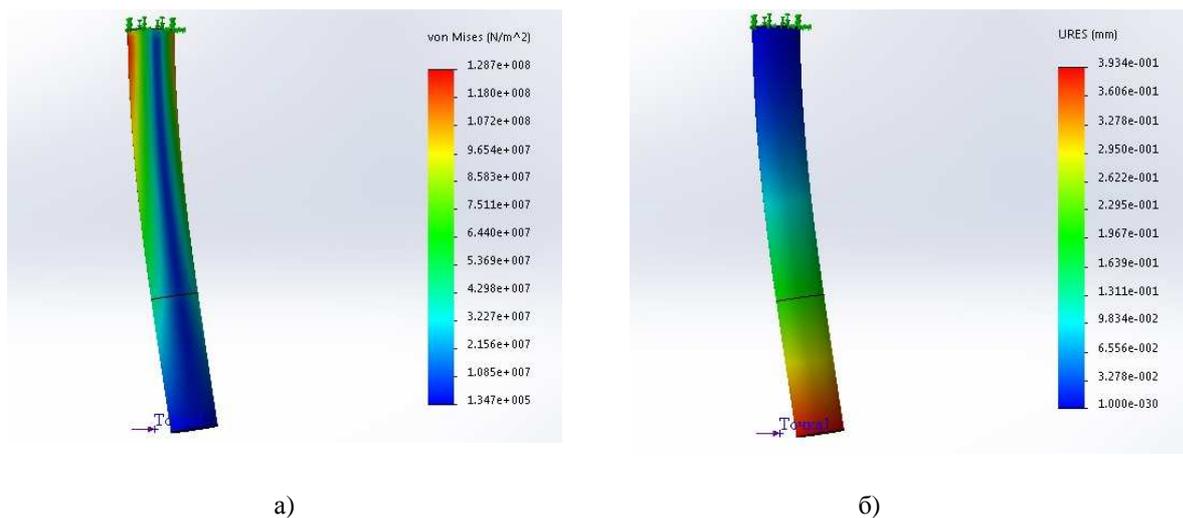


Рис. 2. Картины распределения величин напряжений в модели составной фрезы (а) и изменения по длине фрезы величин её деформаций (перемещения от вертикального положения) (б)

Аналогичные данные были получены для монолитных фрез.

Погрешность изготовления детали [6] определяется величиной B отклонения обработанной поверхности от теоретического положения, которая тем меньше, чем меньше длина (протяжённость) этой поверхности. На рис. 3 и 4 приведены сопос-

тавительные номограммы для рассмотренных вариантов исполнения хвостовика составной фрезы - из конструкционной стали марки 40Х, инструментальной быстрорежущей стали марки Р18, твёрдого сплава неинструментального назначения марки Т30К4.

Из номограмм следует, что такая точность обработки составными фрезами вполне приемлема для сопрягаемых поверхностей деталей общего машиностроения и изделий авиационного назначения.

Анализ дополнительных результатов исследования [6] показывает, что форсирование режимов обработки существенно снижает эффективность применения со-

ставных фрез и не должно допускаться программными средствами станков с ЧПУ.

В целом можно заключить следующее:

1. Составные фрезы в значительной области условий эксплуатации составляют конкуренцию цельным фрезам либо незначительно уступают им (в пределах точностных параметров, применимых в общем машиностроении и авиастроении).

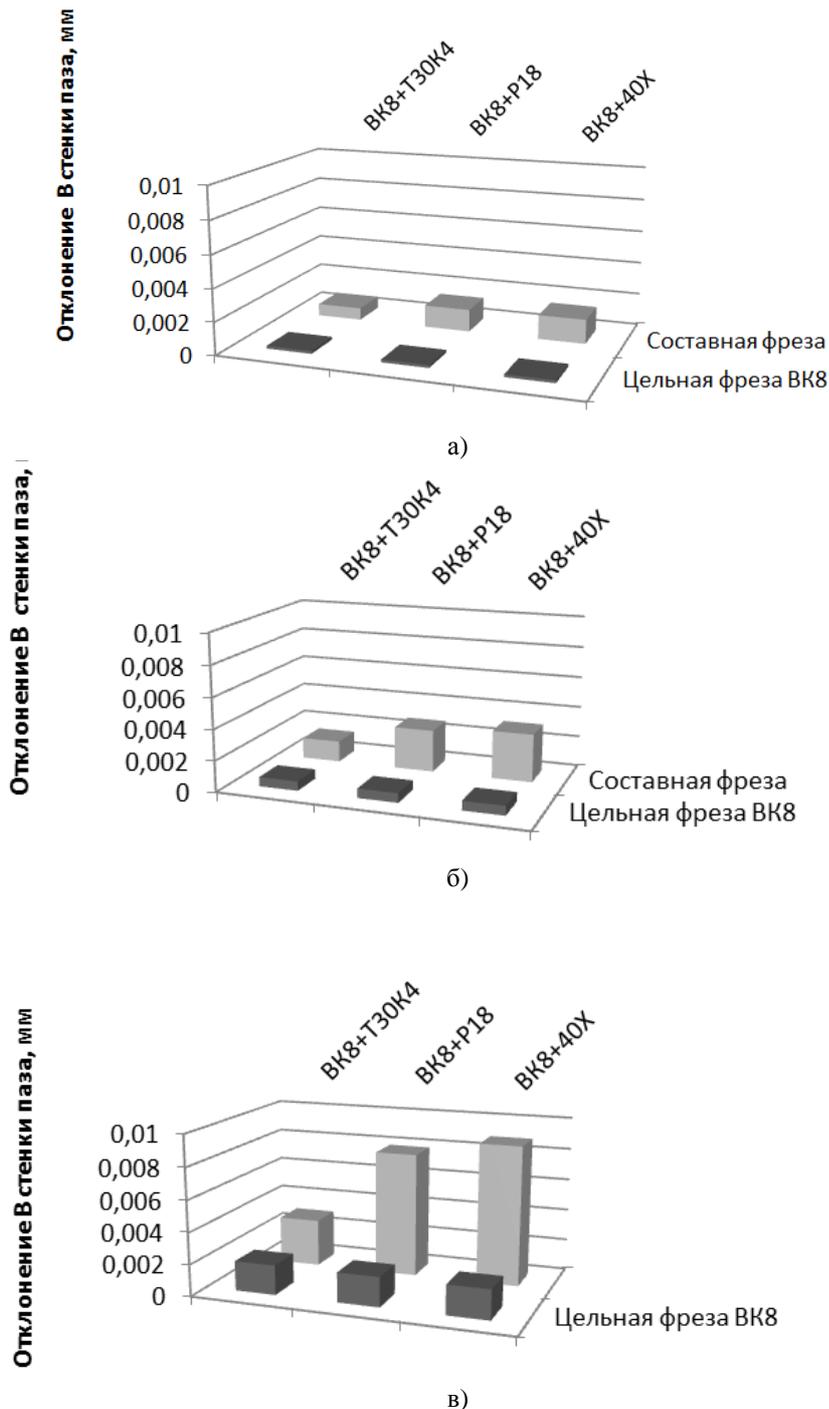


Рис. 3. Номограмма сравнений точностных (по отклонению В) параметров обработки стенки паза, имеющей протяженность 5 мм, цельной (монокристаллической) и составной фрезой при общей длине фрезы: а - 90 мм; б - 120 мм; в - 220 мм

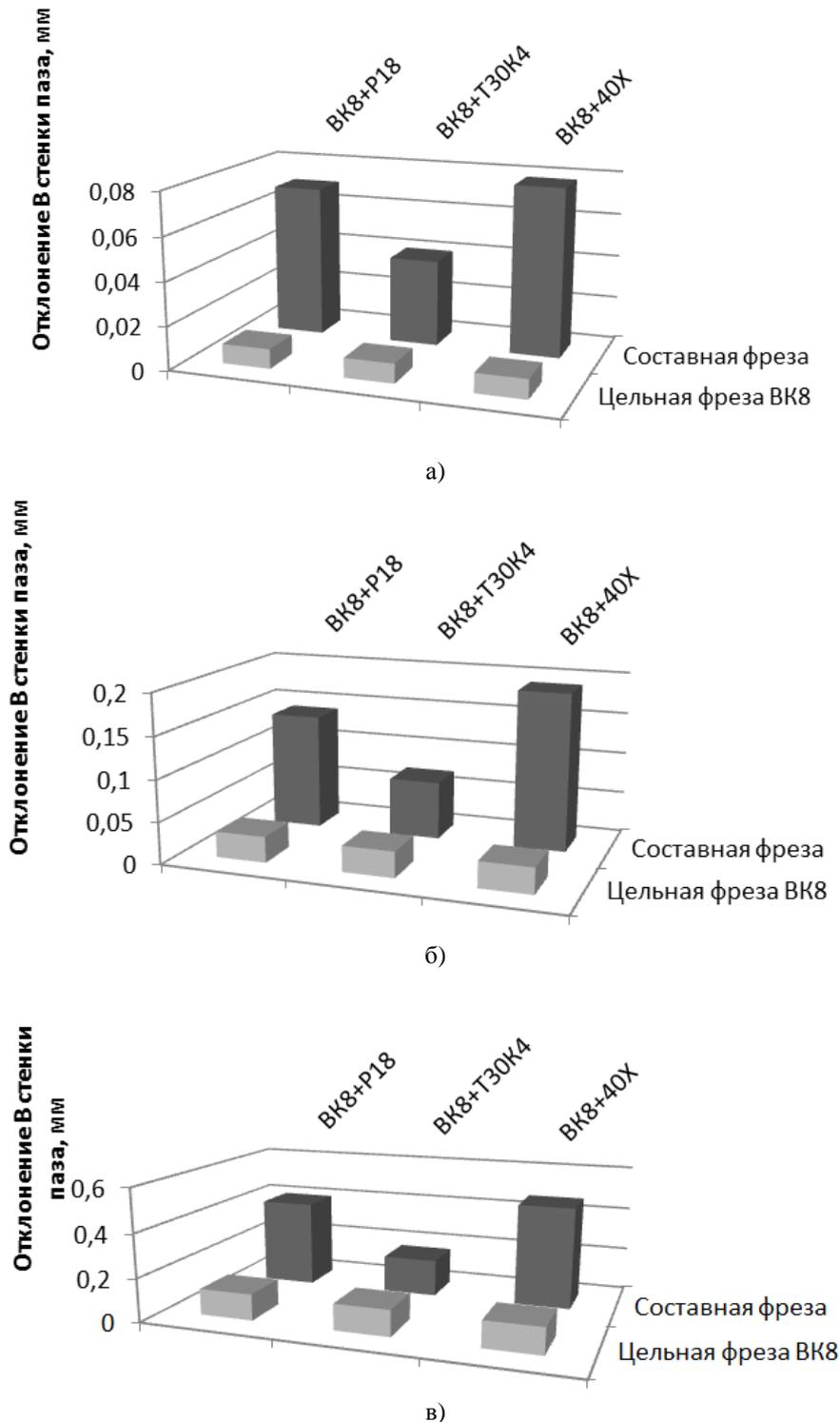


Рис. 4. Номограмма сравнений точностных (по отклонению В) параметров обработки стенки паза, имеющей протяженность 40 мм, цельной (монокристаллической) и составной фрезой при общей длине фрезы: а - 90 мм; б - 120 мм; в - 220 мм

2. Подвергнутые моделированию варианты конструкции составных фрез оптимизированы ещё не по всем параметрам, позволяющим управлять технико-экономическими показателями высокоскоростного фрезерования. Тем не менее эти

варианты конструкции составных фрез составляют конкуренцию цельным концевым твердосплавным фрезам.

3. Основной диапазон конкуренции составных фрез приходится на области применения, где точность изготовления не

превышает общемашиностроительных требований. Чем меньшей длины требуется фреза, тем более конкурентны составные фрезы из-за незначительного различия их деформации в сравнении с деформацией цельных фрез и значительной (до 30 %) экономии твёрдого сплава. Чем

Моделирование процесса резания с позиций эффективности стружкообразования, выполненное с помощью специализированного программного обеспечения ANSYS Workbench, показало возможность частичного его сопряжения с программным продуктом SolidWorks (передача 3D-модели детали).

При определении напряженно-деформированного состояния заготовки и

большей длины требуется фреза, тем ещё больше (до 70 %) экономия твёрдого сплава, но и больше величина деформации фрезы, что снижает точность и производительность обработки, т.е. ограничивает область применения составных фрез.

резца в текущие моменты процесса резания построена конечноэлементная сетка на основе элемента SOLID164, который является стандартным для моделирования трехмерных объектов в среде ANSYS. Элемент SOLID164 представляет собой объемный шестигранник с восемью узлами, расположенными в вершинах. Пример принятой конечноэлементной модели показан на рис. 5.

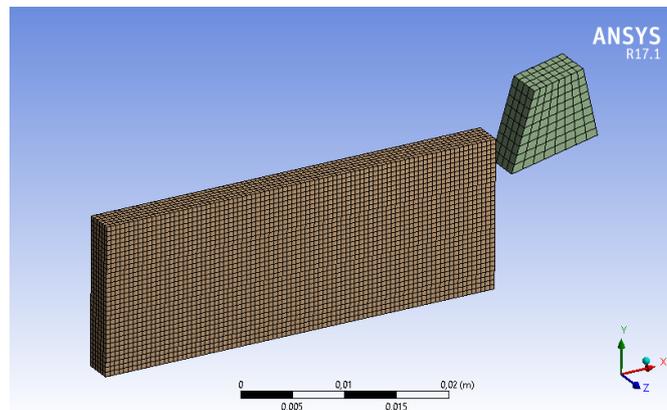


Рис. 5. Конечноэлементная модель заготовки и резца

Данный подход в применении программного продукта ANSYS Workbench Explicit Dynamics показывает большие преимущества моделирования в сравнении с подходами, использованными в работах [7; 8], и совместим с методом [9], специально разработанным применительно к авиационно-космическим технологиям. Так, можно выполнить динамическое моделирование процесса резания с возможностью отслеживать напряженно-деформированное состояние заготовки в различные моменты времени на протяжении всего процесса.

В результате применения программного продукта ANSYS построены картины напряжений и деформаций режущего клина и обрабатываемого материала без при-

вязки к конкретному методу обработки (точение, строгание, фрезерование). Смоделированы условия резания с глубиной 4 мм на всю длину заготовки по всей её ширине для трёх принципиально разных обрабатываемых материалов: алюминиевого сплава марки АМг6; конструкционной стали марки 40Х; титанового сплава марки ВТ6. Программа позволяет изучить картины распределения нормальных эквивалентных и касательных напряжений, картины деформаций в любой момент резания (от момента врезания клина до момента его выхода из тела заготовки).

На рис. 6 показаны примеры изменения картины напряжений в некоторый текущий момент резания и в момент выхода режущего клина.

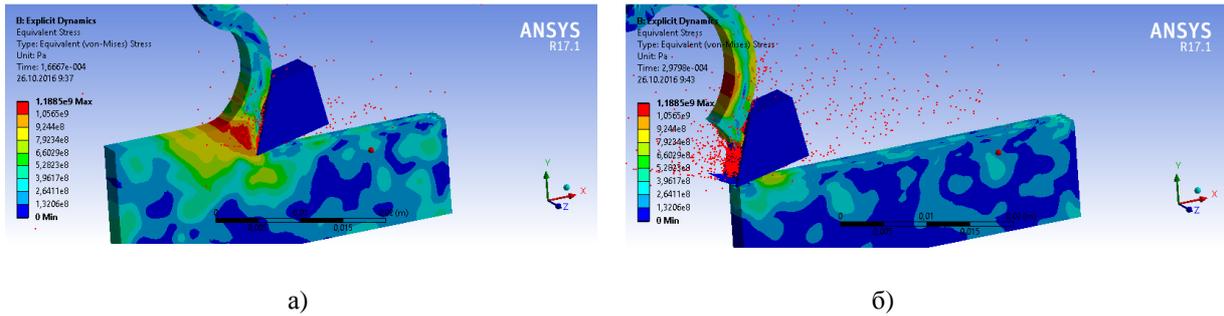


Рис. 6. Картины распределения напряжений в заготовке (алюминиевый сплав марки АМг6) в моменты: а - резания на двух третях длины заготовки; б - выхода режущего клина из материала заготовки

Соответствующие картины получены для случаев обработки конструкционной стали марки 40Х и титанового сплава марки ВТ6. Картины принципиально отличаются как друг от друга, так и от приведённых на рис. 6.

Проверка адекватности используемой электронной модели процесса резания осуществлена, как и в работе [8], методом сравнения (рис. 7) расчётной картины с экспериментальной картиной, полученной в момент формирования корня стружки

[10; 11]. На рис. 7б стрелками показано местоположение зон с критическими величинами напряжений: стрелки вблизи режущей кромки инструмента указывают местоположение материала заготовки, имеющего напряжения, сопоставимые с напряжениями сдвига, т.е. предполагаемое местоположение плоскости сдвига; стрелка вблизи белой зоны у передней поверхности показывает предполагаемое местоположение зоны наростообразования.

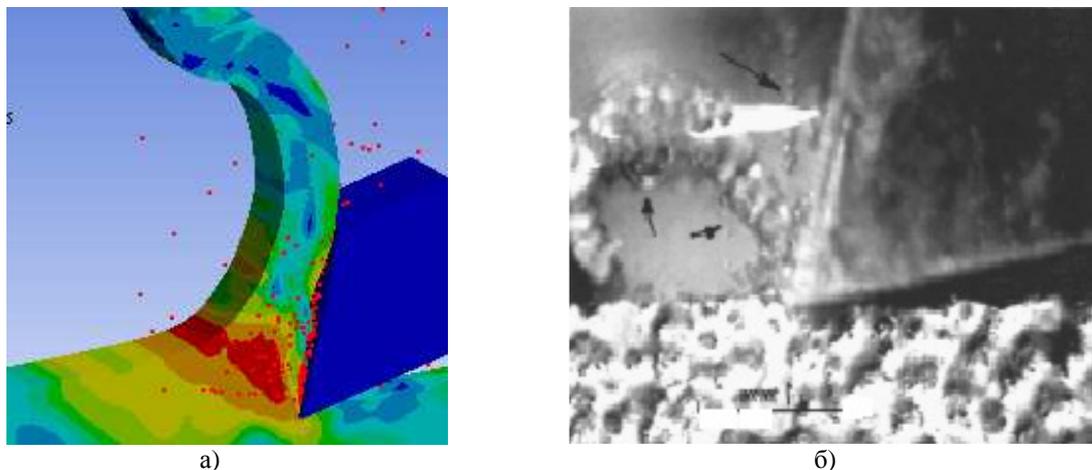


Рис. 7. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными [12] (материал заготовки - АМг6): а - виртуальная модель процесса резания; б - фото корня стружки

Аналогичные картины для конструкционной стали 40Х выглядят иначе и позволяют прогнозировать формирование стружек надлома и скола (рис. 8).

Анализ полученных данных позволяет заключить:

1) максимальные значения напряжений достигаются в первые же мгновения резания, затем они стабилизируются и остаются

постоянными;

2) принятая модель чувствительна к изменению состояния материала настолько, что позволяет зафиксировать моменты разделения стружки на сегменты, отделения стружки от материала заготовки, образования заусенца в момент выхода инструмента из материала заготовки.

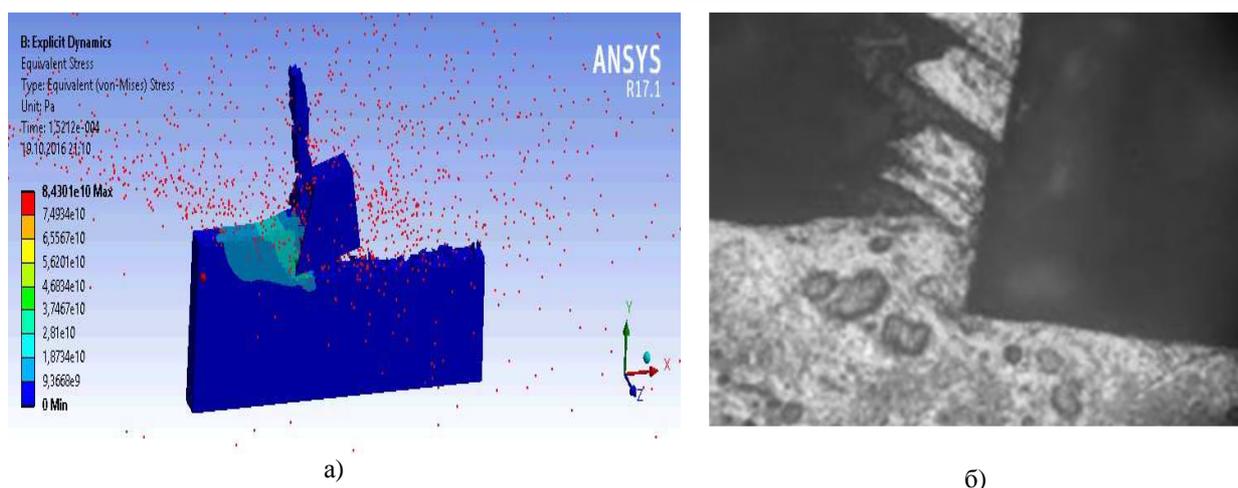


Рис. 8. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными [12] (материал заготовки - сталь 40X): а - виртуальная модель процесса резания; б - фото корня стружки

Сопоставление результатов для титанового сплава марки ВТ6 показано на рис. 9.

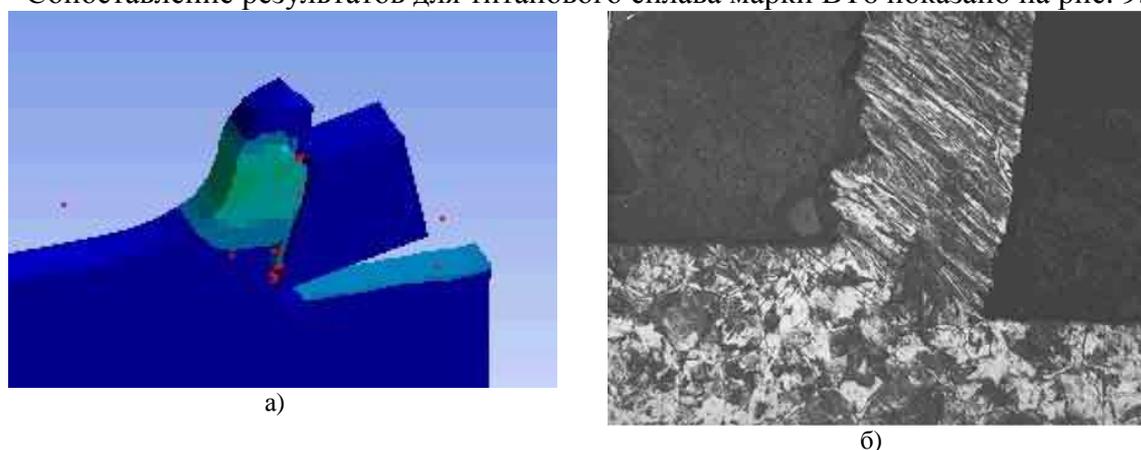


Рис. 9. Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными [12] (материал заготовки - ВТ6): а - виртуальная модель процесса резания; б - фото корня стружки

Выводы

1. Полученные результаты подтвердили, что в программной среде ANSYS Workbench определение напряженно-деформированного состояния заготовки и резца осуществимо. Кроме того, было показано, что эти результаты не противоречат данным, полученным в ходе экспериментов, проведенных с применением иных методов исследования [9-11].

2. Используемые в работе подход и программная среда позволяют более точно в сравнении с другими [9-11] моделировать напряженное состояние материала инструмента и тем самым повысить точность проектирования параметров инструмента под конкретные условия эксплуатации.

Авторы выражают благодарность профессору В. Ю.Верещагину за помощь в подготовке работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. на полез. модель 154597 РФ, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с центрирующим пояском / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Мокрицкая Е.Б., Саблин

П.А., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108187/02; заявл. 10.03.15; опублик. 27.08.15, Бюл. № 24.

2. Пат. на полез. модель 154595 РФ, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с пояском и шлицем / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Мокрицкая Е.Б., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108200/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
3. Пат. на полез. модель 154596 РФ, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с центрирующим конусом / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Верещагина А.С., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108180/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
4. Пат. на полез. модель 154594 РФ, МПК В23С5/10. Фреза концевая составная с пояском и крестовым шлицем / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Алтухова В.В., Мокрицкая Е.Б., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108174/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
5. Пат. на полез. модель 154593 РФ, МПК В23С5/10. Фреза составная с центрирующим конусом и шлицевым соединением / Мокрицкий Б.Я., Пустовалов Д.А., Панова Е.А., Алтухова В.В., Саблин П.А., Кваша В.Ю.; патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. - № 2015108181/02; заявл. 10.03.15; опубл. 27.08.15, Бюл. № 24.
6. Мокрицкий, Б.Я. Управление эффективностью применения монолитных и составных концевых твердосплавных фрез при обработке заготовок деталей авиационного назначения / Б.Я. Мокрицкий, А.С. Верещака, Е.Б. Мокрицкая, Н.С. Ческидова // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты: кол. моногр. / С.К. Амбросимов [и др.]; под ред. А.В. Киричека. - М.: Спектр, 2016. - Т. VII. - С. 266-348.
7. Антонов, А.С. Имитационная модель стружкообразования при резании горячего металла методом конечных элементов / А.С. Антонов, Д.В. Криворучко, А.И. Банников // Известия ВолгГТУ. - 2014. - № 4. - С. 7-9.
8. Корендясев, Г.К. О конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов резанием (часть 2) / Г.К. Корендясев // Вестник научно-технического развития. - 2015. - № 3. - С. 14-24.
9. Нарыжный, А.Г. Термомеханическая модель резания резцом с износостойким покрытием / А.Г. Нарыжный, Ю.Н. Куценко, М.В. Гром, Д.Р. Степаненко // Авиационно-космическая техника и технология. - 2014. - № 5. - С. 4-9.
10. Залого, В.А. Обзор способов экспериментального определения параметров уравнения состояния пластических материалов для моделирования методом конечных элементов их механической обработки / В.А. Залого, Д.В. Криворучко // Резание и инструмент в технологических системах. - 2005. - № 69. - С. 193-202.
11. Криворучко, Д.В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого. - Сумы: Унив. кн., 2012. - 496 с.
12. Kunio Ueharaa. Hydrogen gas generation in the wet cutting of aluminum and its alloys / Kunio Ueharaa, Hideo Takeshita, Hiromi Kotaka // Journal of Materials Processing Technology. - 2002. - № 127. - С. 174-177.
1. Utility Model Patent 154597 the RF, IPC V23S5/10. *End Composite Mill with Centering Spigot* / Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Panova E.A., Mokritskaya E.B., Sablin P.A., Kvasha V.Yu.; patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University - № 2015108187/02; applied 10.03.15; published. 27.08.15, Bull. № 24.
2. Utility Model Patent 154595 the RF, IPC V23S5/10. *End Composite Mill with Spigot and Slot* / Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Panova E.A., Mokritsky E.B., Kvasha V.Yu.; patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University - № 2015108200/02; applied 10.03.15; published 27.08.15, Bull. № 24.
3. Utility Model Patent 154596 the RF, IPC V23S5/10. *End Composite Mill with Centering Cone* / Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Panova E.A., Vereshchagina A.S., Kvasha V.Yu.; patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University - № 2015108180/02; applied 10.03.15; published 27.08.15, Bull. № 24.
4. Utility Model Patent 154594 the RF, IPC V23S5/10. *End Composite Mill with Spigot and Cross Slot* / Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Panova E.A., Altukhova V.V., Mokritskaya E.B., Kvasha V.Yu.; patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University - № 2015108174/02; applied 10.03.15; published 27.08.15, Bull. № 24.
5. Utility Model Patent 154593 the RF, IPC V23S5/10. *Composite Mill with Centering Cone and Slot Joint* / Mokritsky B.Ya., Pustovalov D.A., Panova E.A., Altukhova V.V., Sablin P.A., Kvasha V.Yu.; patent holder: Komsomolsk-upon-Amur State Technical University - № 2015108181/02; applied 10.03.15; published 27.08.15, Bull. № 24.
6. Mokritsky, B.Ya. Efficient management in use of solid and composite end hard-alloy mills at machining blanks of aircraft parts / B.Ya. Mokritsky, A.S. Vereshchaka, E.B. Mokritskaya, N.S. Cheskidova // *Efficient Engineering Techniques, Equipment, and Tools*: collective monograph / S.K. Ambrosimov [et al.]; under the editorship of A.V. Kirichek. - M.: Spectrum, 2016. - Vol. VII. - pp. 266-348.
7. Antonov, A.S. Simulation model of chip formation at hot metal cutting by method of finite elements / A.S. Antonov, D.V. Krivoruchko, A.I. Bannikov // *Proceedings of VolgaSTU*. - 2014. - № 4. - pp. 7-9.

8. Korendyasev, G.K. On finite element modeling of metal cutting process (Part 2) / G.K. Korendyasev // *Bulletin of Scientific Technical Development* - 2015. - № 3. - pp. 14-24.
9. Naryzhny, A.G. Thermo-mechanical model of cutting by cutter with wear-resistant coating / A.G. Naryzhny, Yu.N. Kutsenko, M.V. Grom, D.R. Stepanenko // *Aerospace Equipment and technology* - 2014. - № 5. - pp. 4-9.
10. Zaloga, V.A. Review of methods for experimental definition of equation parameters of plastic materials state for simulation by method of finite elements of their machining / V.A. Zaloga, D.V. Krivoruchko // *Cutting and Tool in Technological Systems*. - 2005. - № 69. - pp. 193-202.
11. Krivoruchko, D.V. *Simulation of Cutting Processes by Finite Element Method: Methodological Fundamentals*: monograph / D.V. Krivoruchko, V.A. Zaloga - Sumy: Univ. Kn., 2012. – pp. 496.
12. Kunio Ueharaa. Hydrogen gas generation in the wet cutting of aluminum and its alloys / Kunio Ueharaa, Hideo Takeshitaa, Hiromi Kotaka // *Journal of Materials Processing Technology*. - 2002. - № 127. - С. 174-177.

Статья поступила в редколлегию 1.12.16.

Рецензент: д.т.н., профессор Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета Черномас В.В.

Сведения об авторах:

Мокрицкий Борис Яковлевич, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, e-mail: boris@knastu.ru.

Киричек Андрей Викторович, д.т.н., профессор, проректор по перспективному развитию Брянского государственного технического университета, e-mail: avkbgtu@gmail.com.

Mokritsky Boris Yakovlevich, Prof. of the Dep. “Engineering Techniques) Komsomolsk-upon-Amur State Technical University, e-mail: boris@knastu.ru.

Kirichek Andrey Viktorovich, D.Eng., Prof., Prorector for Promising Development, Bryansk State Technical University, e-mail: avkbgtu@gmail.com.

Морозова Анна Валентиновна, к.социол.н., Брянский государственный технический университет, e-mail: niotiostu@gmail.com.

Мокрицкая Елена Борисовна, доцент кафедры «Вычислительные системы» Дальневосточного федерального университета, e-mail: mokritskayae@mail.ru.

Morozova Anna Valentinovna, Ca. Sociol., Bryansk State Technical University, e-mail: niotiostu@gmail.com.

Mokritskaya Elena Borisovna, Assistant Prof. of the Dep. “Computer Systems”, Far-Eastern Federal University, e-mail: mokritskayae@mail.ru.