

УДК 621.9

РЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ, УПРОЧНЕННЫМ АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ, В ПРОГРАММЕ DEFORM

А. Н. ЖИГАЛОВ

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Республика Беларусь

Для ускоренного проектирования и исследования нового наукоемкого процесса – метода аэродинамического звукового упрочнения твердых сплавов – разработаны научные основы имитационного моделирования процесса резания твердосплавным инструментом в программном продукте DEFORM. Созданы на основе решения контактной задачи теории упругости для реологических процессов аналитические зависимости для определения сил резания и получены эмпирические зависимости износа по задней поверхности от времени резания, которые являются базовыми в созданной реологической модели процесса износа при прерывистом резании. Результаты моделирования давления, скорости и температуры, износа, сил резания позволили изучить основы нового процесса аэродинамического упрочнения и показали, что обработка твердыми сплавами, упрочненными данным методом, деталей из стали 45 ($v = 158,3$ м/мин; $s = 0,12$ мм/зуб; $t = 1,0$ мм) способствует за счет снижения износа увеличению стойкости инструмента приблизительно на 60 %.

Ключевые слова: аэродинамическое упрочнение, реологическое моделирование, программа Deform.

RHEOLOGICAL SIMULATION OF THE CUTTING PROCESS USING CARBIDE TOOLS HARDENED BY AERODYNAMIC ACTION IN THE DEFORM PROGRAM

A. N. ZHIGALOV

Educational Institution “Baranovichi State University”,
the Republic of Belarus

The scientific basis for cutting process simulation of carbide tools in the DEFORM program has been developed. It has been done for accelerated design and research of a new high-tech process which is the method of aerodynamic sound hardening of carbides. Based on the contact problem solution of the elasticity theory for rheological processes, analytical dependences for determining cutting forces have been created and empirical dependences of wear on the rear surface on cutting time have been obtained, that are basic in the created rheological model of the wear process during interrupted cutting. The results of simulating pressure, speed, temperature, wear, and cutting forces made it possible to study the fundamentals of a new aerodynamic hardening process and showed that the processing of 45 steel parts using carbides hardened by this method ($v = 158.3$ m/min; $s = 0.12$ mm/tooth; $t = 1.0$ mm) reduces tool wear and increases its durability by approximately 60 %.

Keywords: aerodynamic hardening, rheological simulation, DEFORM program.

Введение

Повышение стойкости металлорежущего твердосплавного инструмента, работающего при прерывистом резании, можно достичь за счет упрочнения инструмента аэродинамическим звуковым методом [1], [2]. Для ускорения проектирования и реализации нового наукоемкого технологического процесса обработки инструментом, обработанным методом аэродинамического звукового упрочнения (АДУ), необходимо с максимальной быстротой произвести его всестороннее изу-

чение, оперативно выявить влияние технологических и физических параметров процесса на качество обработки и на структурные свойства инструмента, с помощью которого реализуется такой процесс. Описать взаимосвязи большого количества факторов, влияющих на такие процессы, на стадии создания является сложной задачей в связи с неизученностью процесса, отсутствием теоретической информации о нем. Это является главным сдерживающим фактором внедрения новых технологий в производство.

Существующие интегрированные автоматизированные конструкторско-технологические системы, основанные на математических, эмпирических и аналитических алгоритмах, описывающих известные принципы и взаимосвязи, протекающие в технологических процессах, позволяют осуществлять моделирование в соответствии с обобщенным алгоритмом функционирования САФ-системы (Computer Aided Forming). Использование САФ-системы базируется на особенностях функционально ориентированных технологий на основе принципа параллельного проектирования. В основе этой системы лежит анализ имитационной реологической модели технологических переходов, комплекс функциональных модулей и аналитических приложений формирования точностных, термомодеформационных, микрогеометрических и структурно-фазовых параметров обрабатываемых поверхностей. Задача ускоренного исследования решается с помощью имитационного моделирования процессов резания. Наиболее прогрессивным методом исследования является создание имитационных реологических моделей процессов резания, базирующихся на числовых методах, которые дают возможность решать задачу деформирования и разрушения срезаемого слоя на основе фундаментальных уравнений термодинамики тела путем дискретизации пространства методом конечных элементов в программном продукте DEFORM, являющимся специализированным инженерным программным комплексом, предназначенным для анализа процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки [3].

В программном продукте DEFORM используются аналитические приложения, описывающие в связи между собой отдельные процессы при резании и их влияние на результаты формирования параметров резания и показателей качества обработки, структуры и свойств режущих инструментов. Исходными данными для моделирования процесса резания в DEFORM являются: 2D или 3D модель детали и инструмента с нанесенной лагранжевой или эйлеровой сеткой на поверхности; режимы резания; геометрия режущего клина, его материал и покрытие; прочностные, физико-механические, теплофизические характеристики обрабатываемого материала; модель износа лезвия инструмента и кинетика наростообразования; нормативная погрешность сходимости результатов моделирования по силовому вектору, вектору скорости и допустимой геометрической погрешности; тип задачи деформации и течения металла; вид итерационного метода расчета; выбор расчетного ядра и др. В такой постановке задача является синергетической, связанной с изучением процессов самоорганизации, поддержания устойчивости и распада подсистем различной природы на основе методов математической физики («формальных технологий»). Однако систему DEFORM, с целью повышения точности расчетов и исследований, необходимо дополнять конкретными аналитическими зависимостями и обобщающими критериями, более точно описывающими особенности процесса механической обработки.

Основная часть

Цель настоящего исследования – на основе разработанной реологической модели процесса износа режущего лезвия твердосплавного металлорежущего инструмента, обеспечивающей формализацию связей между структурой протекания деформационных, сдвиговых, термодинамических явлений, происходящих в зоне резания, и эксплуатационными характеристиками инструмента и обрабатываемой детали, получить эмпирические зависимости износа твердосплавных пластин от времени резания и на их базе провести имитационные исследования в программном продукте DEFORM процесса аэродинамического звукового упрочнения.

Путем решения контактной задачи теории упругости для реологических процессов разработаны аналитические зависимости для определения сил резания в продольном P_{np} и поперечном P_n направлениях, а также окружной силы резания P при торцовом фрезеровании [1]:

$$P_{np} = k_{np} \left(t - h_3 \sin \varphi_3 - \frac{P_0}{j} \right) s_z p;$$

$$P_n = k_n \left(t - h_3 \sin \varphi_3 - \frac{P_0}{j} \right) s_z p;$$

$$P = \left(t - h_3 \sin \varphi_3 - \frac{P_0}{j} \right) s_z p,$$

где k_{np} и k_n – коэффициенты, связывающие силы резания P_{np} , P_n и P ; t – глубина фрезерования; h_3 – износ по задней поверхности; φ_3 – угол вспомогательной режущей кромки; P_0 – нормальная сила резания; j – жесткость технологической системы; s_z – подача на зуб; p – удельное давление.

Как видно, силы резания P_{np} , P_n и P зависят от упруго-пластического контакта задней поверхности режущего инструмента с поверхностью обработки и определяются условиями этого контакта и его размерами, т. е. связаны с величиной износа по задней поверхности h_3 .

Проведены экспериментальные исследования твердосплавных пластин MC111 и MC131 (по классификации «Sandvik Coromant», Швеция), неупрочненных и упрочненных методом АДУ, применительно к фрезерованию заготовок из стали 45.

Исследования проводились на основании разработанных математической модели и методики параметрической оптимизации износа и ресурсной стойкости режущего твердосплавного инструмента, упрочненного методом АДУ, позволяющие описывать в виде эмпирических зависимостей процесс протекания износа инструмента от технологических параметров обработки и прогнозировать на их базе оптимальные величины стойкости и режимы резания [3].

Исследованиям подвергались вариации трех составляющих, как наиболее влияющих на процесс износа, режимов резания: скорость резания v_ϕ , подача на зуб s_z и глубина резания t . Режимы резания изменялись в диапазонах: $v_\phi = 124,6\text{--}197,8$ м/мин; $s_z = 0,11\text{--}0,26$ мм/зуб; $t = 0,5\text{--}1,5$ мм.

Матрица планирования эксперимента указана в таблице.

**Применяемые режимы резания при фрезеровании заготовок
из стали 45 твердосплавными пластинами MC131 и MC111,
без упрочнения и с АДУ**

Вариации режимов обработки для пластин MC131, MC111								
Номер опыта	v_f , м/мин		s_z , мм/зуб		t , мм		n_f , об/мин	$s_{ст}$, мм/об
1	158,3	0	0,13	0	1,0	0	800	630
2	124,6	-1	0,13	0	1,0	0	630	500
3	158,3	0	0,13	0	1,5	+1	800	630
4	158,3	0	0,13	0	0,5	-1	800	630
5	158,3	0	0,11	-1	1,0	0	800	630
6	158,3	0	0,26	+1	1,0	0	800	1250
7	197,8	+1	0,13	0	1,0	0	1000	800

После обработки результатов эксперимента получены эмпирические зависимости износа по задней поверхности h_z от времени резания τ , описываемые зависимостями $h_{z(\tau)} = a\tau^n$. Соответственно для неупрочненных и упрочненных сплавов MC111 коэффициенты a и n равны:

$$a_n = -0,0000005v^2 - 0,0003144v - 1,5128205s^2 + 0,7130769s + 0,00000001t^2 + 0,3t + 0,138;$$

$$n_n = -0,0000412v^2 - 0,0096582v + 4,5641026s^2 - 1,5953846s + 0,0004t^2 + 0,044t + 1,067;$$

$$a_y = -0,00001054v^2 - 0,0038039v + 4,6153846s^2 - 1,7076923s + 0,064t^2 - 0,092t + 0,656;$$

$$n_y = -0,00000695v^2 - 0,00014724v - 4,7692308s^2 + 1,944615s - 0,074t^2 + 0,117t - 0,011.$$

Соответственно для неупрочненных и упрочненных сплавов MC131 коэффициенты a и n равны:

$$a_n = -0,00000768v^2 + 0,0023803v - 14,0s^2 + 5,36s + 0,134t^2 - 0,217t - 0,391;$$

$$n_n = -0,0001017v^2 - 0,0310285v + 63,3846154s^2 - 23,6123077s + 0,108t^2 - 0,232t + 4,732;$$

$$a_y = -0,00002567v^2 + 0,00850895v - 16,4871795s^2 + 6,206923s - 0,096t^2 + 0,194t - 1,17;$$

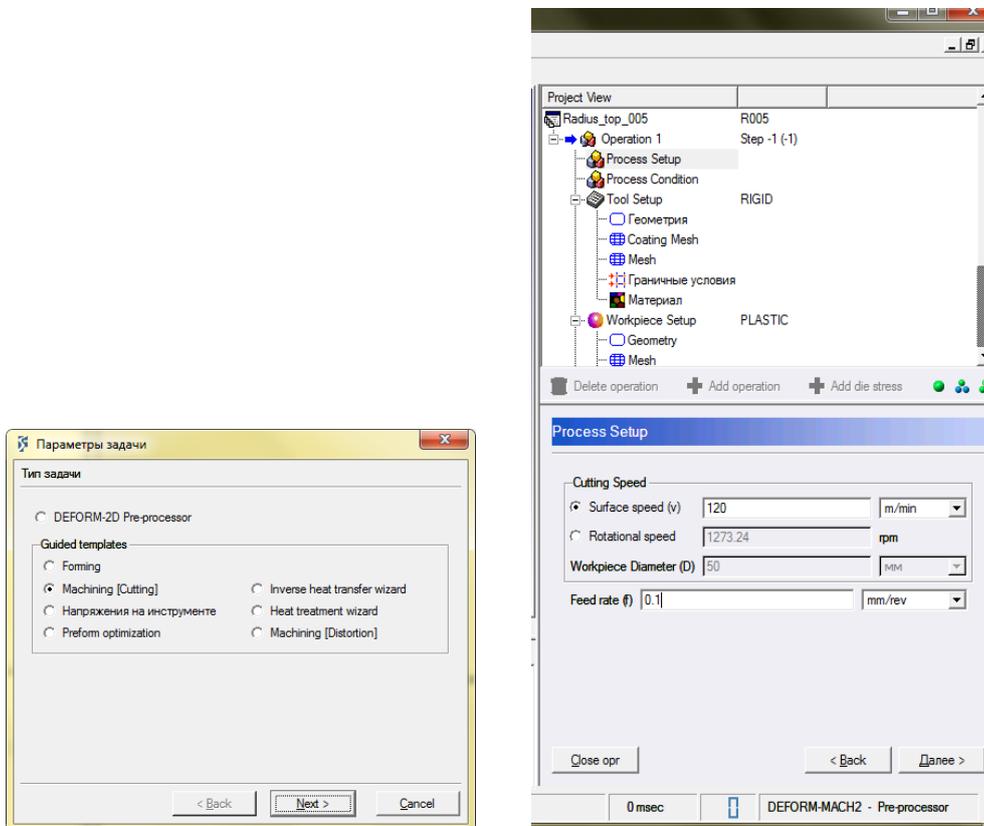
$$n_y = -0,0000915v^2 - 0,0283676v + 58,1794872s^2 - 21,9130769s + 0,214t^2 - 0,431t + 4,492.$$

Полученные формулы для расчета величин износа по задней поверхности h_z от времени резания τ , учитывающие свойства обрабатываемого материала и инструмента, технологические режимы резания являются базовыми в созданной реологической модели процесса износа при прерывистом резании и в совокупности с имеющимися в программном продукте DEFORM аналитическими приложениями позволяют описывать влияние структуры и параметров процессов резания (в том числе термодинамических) как на связи и закономерности формирования точности, микрогеометрии, структурных и фазовых параметров обрабатываемых поверхностей, так и на режущий инструмент.

Описание работы в программном продукте DEFORM

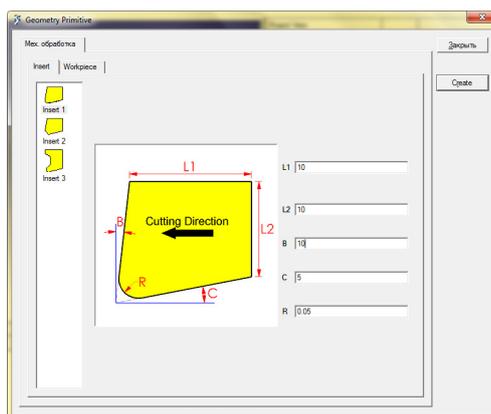
Перед запуском рабочего комплекса DEFORM производится создание ряда ходов (некоторые из них приведены на рис. 1), которые выполняются с учетом поставленных для исследования целей, а именно: создание задачи (рис. 1, а); выбор геометрии инструмента (рис. 1, б); назначение режимов резания (рис. 1, в);

установление условий процесса; настройка инструмента; выбор материала и толщины покрытия инструмента; генерирование сетки инструмента и заготовки; выбор материала инструмента; настройка заготовки; назначение геометрии заготовки; генерация сетки для заготовки; выбор материала для заготовки; определение позиции.



а)

б)



в)

Рис. 1. Создание задачи (а), выбор геометрии инструмента (б), назначение режимов резания (в)

Преимуществами системы DEFORM являются: возможность моделирования значительного количества процессов; универсализм программы и понятный интерфейс; хорошая адаптация с другими программными продуктами; широкая база дан-

ных по материалам и инструментам, с учетом их разновидностей и геометрических параметров; любая размерность генерации конечно-элементной сетки и др.

Результаты исследований и их обсуждение

Нижеприведенные результаты получены на твердом сплаве MC131 при фрезеровании стали 45 на режимах резания: скорость $v = 158,3$ м/мин; подача на зуб $s_z = 0,12$ мм/зуб; глубина $t = 1,0$ мм. Типовые результаты моделирования в созданном продукте DEFORM давления, скорости скольжения и температуры, которые возникают в процессе резания на обрабатываемом материале и твердосплавном инструменте, приведены на рис. 2 и представлены в виде фиксации параметров в процессе имитационного резания.

Определение значений давления, скорости и температуры в любой момент времени τ резания имеет большое значение для моделирования скорости износа материала детали и инструмента. На рис. 3 приведен фрагмент из созданного программного продукта в системе DEFORM моделирования возникающих напряжений в зоне резания. Анализ в динамике возникающих напряжений в зоне резания является весьма необходимым фактором для осуществления прогнозирования поведения инструмента.

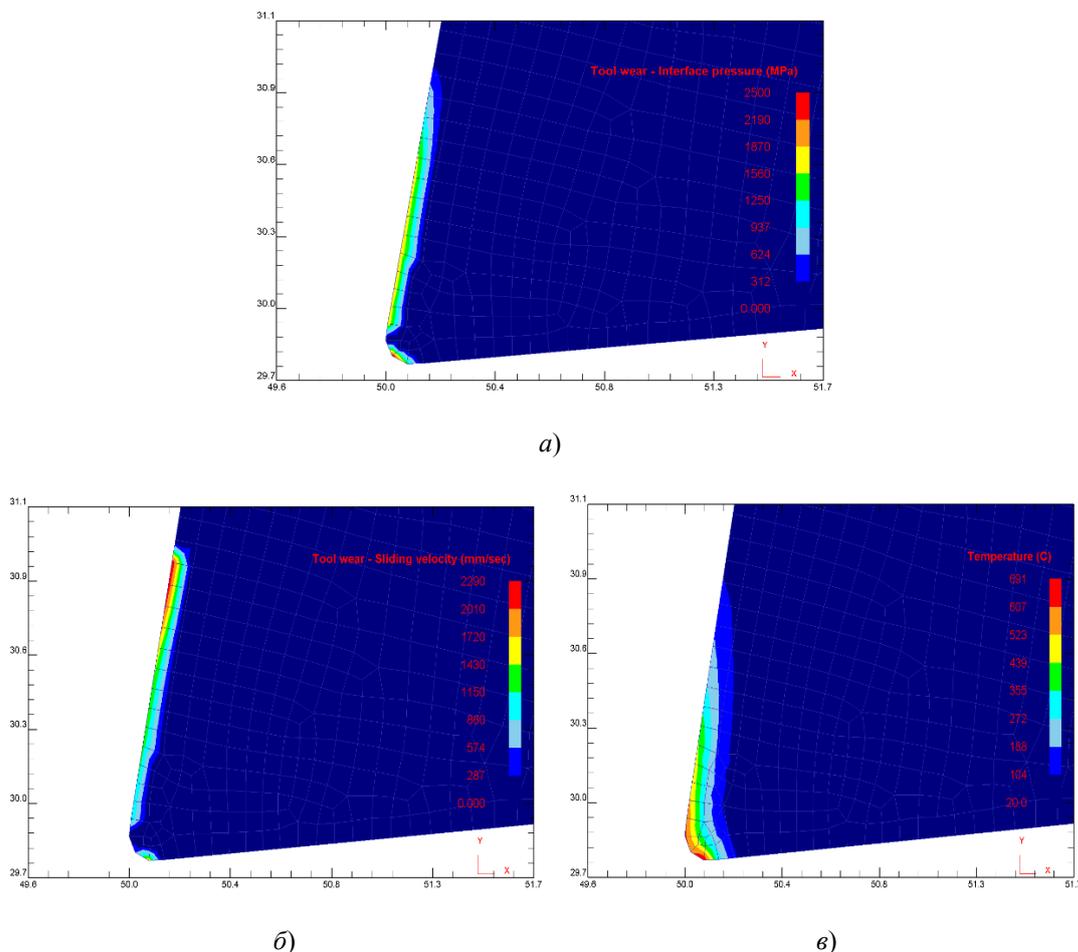


Рис. 2. Результаты моделирования на границе раздела давления (а), скорости скольжения (б) и температуры (в) для фрезерования стали 45 неупрочненным твердосплавным инструментом из сплава MC131 (режимы: скорость $v = 158,3$ м/мин; подача $s_z = 0,12$ мм/зубцы; глубина $t = 1,0$ мм)

Анализ силовых факторов резания по предложенной методике показал, что изменяющиеся составляющие силы резания как по величине, так и по направлению к изнашиваемой поверхности инструмента значительно влияют на процесс износа.

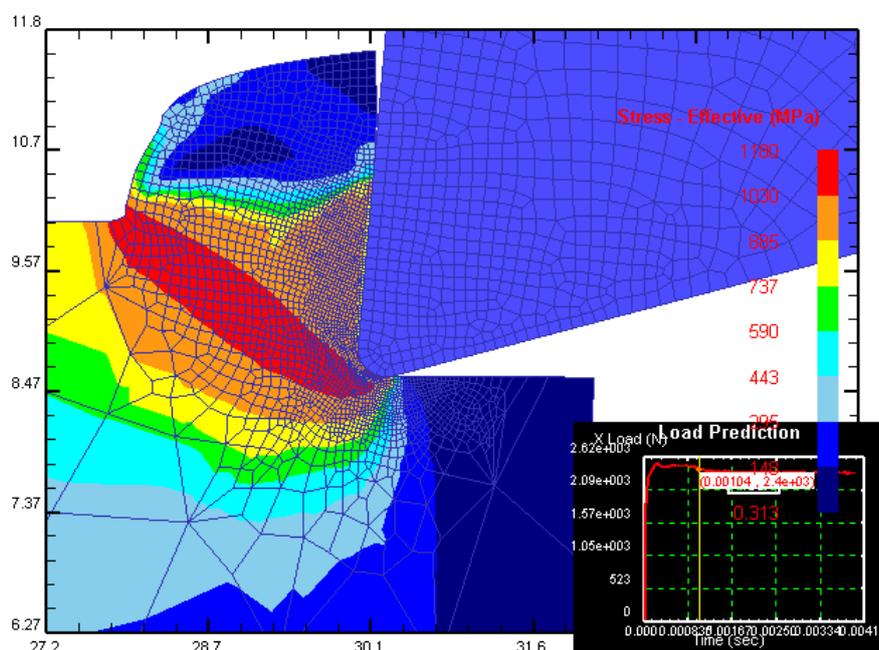


Рис. 3. Результаты моделирования возникающих напряжений в зоне резания при фрезеровании стали 45 неупрочненным твердосплавным инструментом из сплава MC131 (режимы: скорость $v = 158,3$ м/мин; подача $s_z = 0,12$ мм/зуб; глубина $t = 1,0$ мм)

На рис. 4 показаны результаты моделирования износа инструмента из твердого сплава MC131 по передней и задней поверхностям режущего лезвия, полученные в процессе имитационного моделирования в программном продукте DEFORM 2D.

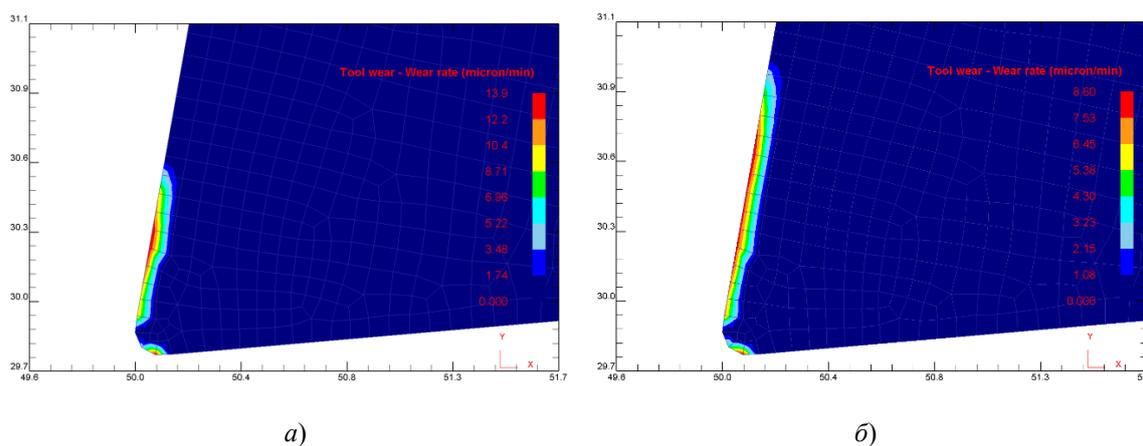


Рис. 4. Результаты имитационных исследований процесса износа инструмента из твердого сплава MC131, неупрочненного (а) и упрочненного методом АДУ (б), по передней и задней поверхностям

На рис. 5 показаны сравнительные результаты моделирования износа инструмента из твердого сплава MC131, построенные с помощью имитационного моделирования в программном продукте DEFORM 2D при различных путях резания.

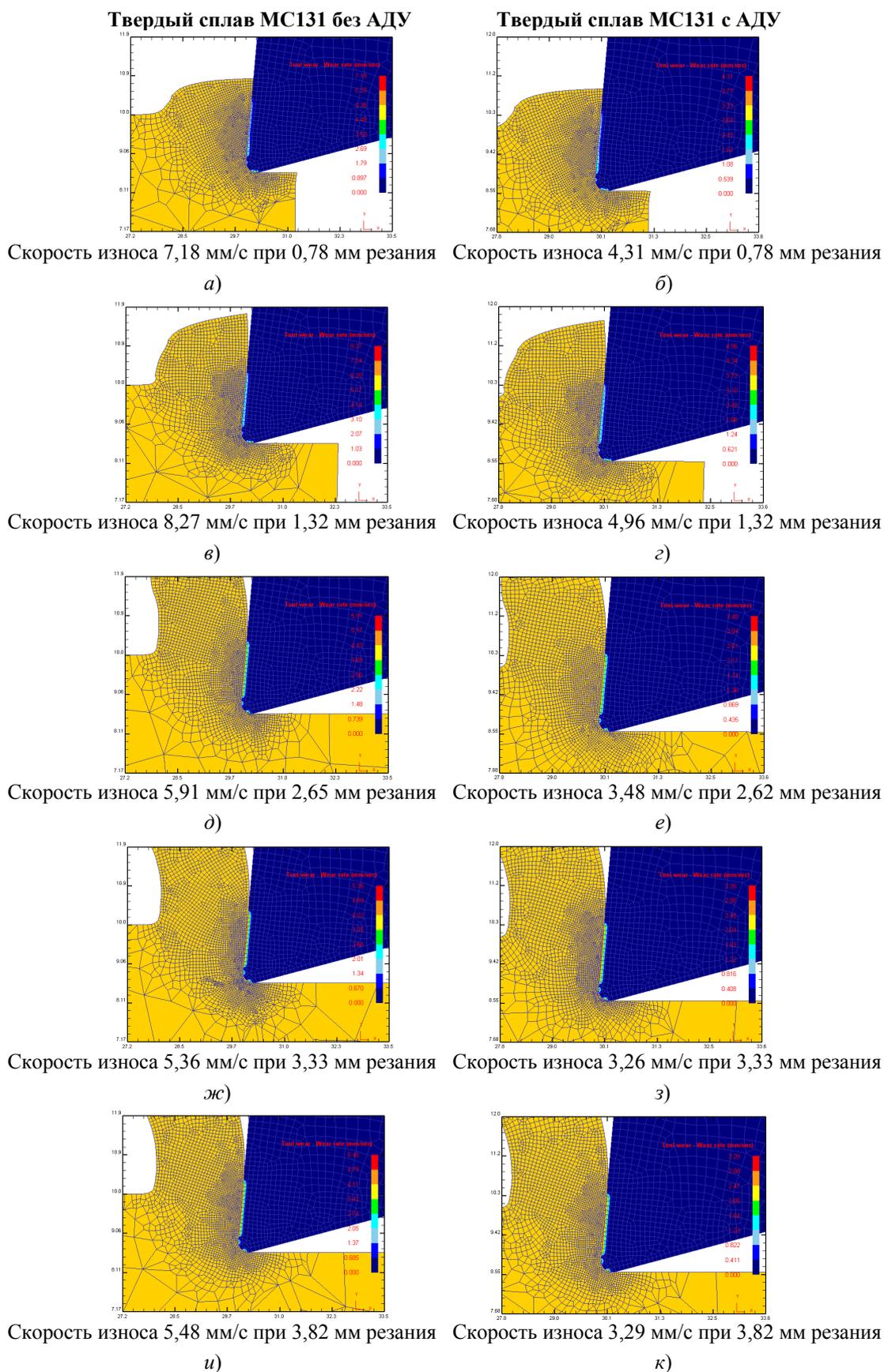


Рис. 5. Результаты имитационных исследований процесса износа инструмента из твердого сплава MC131 без АДУ (*a, в, д, ж, и*) и с АДУ (*б, г, е, з, к*) при разных путях резания

Результаты имитационного моделирования на основе созданной реологической модели в программном продукте DEFORM позволяют получить наиболее полную информацию о процессах внутреннего трения, вязкости, адгезии на поверхностях контакта инструмента и заготовки (стружки), интенсивности сдвига. На основании анализа этих результатов определяется влияние кинематики, рабочих режимов и параметров режущего клина инструмента на волнистость и шероховатость обрабатываемой поверхности, напряженное и фазовое состояние, статические и динамические параметры температурных, деформационных, силовых показателей.

Заключение

При помощи созданной в программном продукте DEFORM реологической имитационной модели резания, с учетом рассмотренных особенностей процесса износа при резании твердыми сплавами, в том числе и упрочненных методом АДУ, подтверждается физическая суть процесса резания, сформулированная в [4]. Сначала инструмент врезается в материал заготовки и под его действием происходит пластическое деформирование слоя металла, которое сопровождается поглощением внешней энергии. Срезаемый слой металла при этом упрочняется и становится хрупким. Далее происходит сдвиг и образование элемента стружки. Теплота резания концентрируется в зоне отделения стружки как результат малой теплопроводности обрабатываемого материала. Это способствует активизации процессов адгезии и диффузии, вызывая разрушение режущих кромок инструмента. Указанные явления совместно с повышенными абразивными и механическими свойствами твердых сплавов при ударной нагрузке интенсифицируют процесс изнашивания режущей кромки фрезерного инструмента. При этом амплитудные изменения сил P_{np} и P_{n} увеличиваются примерно в 2,0 раза по сравнению с устойчивым резанием (токарной обработкой), что в основном и является причиной высокого износа, а также пониженной стойкости режущего инструмента.

Теоретические расчеты и экспериментальные исследования влияния износа на процесс резания и точностные параметры обработки твердыми сплавами при фрезеровании показали, что на процесс износа режущего инструмента оказывает влияние большое количество одиночных и взаимосвязанных параметров, учесть которые аналитически в полном объеме невозможно без компьютерного моделирования.

Результаты имитационных исследований процесса износа в системе DEFORM показали, что обработка твердыми сплавами, упрочненными методом АДУ, деталей из стали 45 ($v = 158,3$ м/мин; $s_z = 0,12$ мм/зуб; $t = 1,0$ мм) способствует за счет снижения износа увеличению стойкости инструмента приблизительно на 60 %. Кроме того, моделирование в программном продукте DEFORM процесса резания твердосплавным инструментом, упрочненным методом АДУ, позволило выявить влияние параметров обработки в любой момент резания на такие факторы процесса, как силы резания, температура, давление и др.

Литература

1. Способ аэродинамического упрочнения изделий : пат. ВУ 2557175 / А. Н. Жигалов, Г. Ф. Шатуров, В. М. Головков. – Оpubл. 20.07.15.
2. Жигалов, А. Н. Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. – Могилев : МГУП, 2019. – 213 с.

3. Zhigalov, A. N. Intnvestigation of the carbide-tipped tool wear hardened by method of aerodynamic impact / A. N. Zhigalov, V. V. Stypnicki // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. – 2018. – Vol. 32, No. 6. – P. 818–821.
4. Ящерицын, П. И. Теория резания : учебник / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Минск : Новое знание, 2006. – 512 с.

Получено 15.10.2018 г.