

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ВРЕЗАНИИ

**В.А. Залого, Д.В. Криворучко, М.Г. Сторчак\*, С.С. Емельяненко, С.Н. Селивоненко**

*Сумский государственный университет, г. Сумы;*

*\*Университет г. Штутгарта, Германия*

*Сокращение времени действия силы резания при изменении толщины стружки является одной из пяти причин возникновения колебаний при большинстве процессов обработки. Экспериментальные исследования влияния параметров резания, геометрии инструмента, материала заготовки и других факторов на постоянную времени стружкообразования ещё не были проведены для широкого диапазона условий резания. Это следует из несовершенства как экспериментальных методов, так и измерительных приборов.*

*В данной статье предложен подход к исследованию постоянной времени стружкообразования с помощью методов конечных элементов. Модель прямогоугольного резания с помощью метода конечных элементов, которая позволяет моделировать формирование стружки, была разработана на основе программы LS-DYNA. В статье представлен анализ влияния скорости резания, переднего угла, радиуса округления режущей кромки, толщины срезаемого слоя, коэффициента трения, свойств обрабатываемого материала на постоянную времени стружкообразования и дано сравнение с известными экспериментальными данными.*

### ВВЕДЕНИЕ

На сокращение времени технологической подготовки производства в современном машиностроении выделяются значительные временные и человеческие ресурсы. Поэтому оптимизация производства на стадии проектирования технологического процесса путем моделирования процесса обработки и прогнозирования показателей рабочих процессов является одним из важнейших инструментов для решения этой проблемы.

В последние годы все большее внимание отечественные и зарубежные специалисты уделяют возможности прогнозирования областей безвибрационных режимов резания (устойчивого процесса резания) для различных видов механической обработки, в частности, точения, сверления, фрезерования и др. В связи с этим обобщение и создание универсальной модели, позволяющей спрогнозировать область режимов устойчивого процесса резания, является актуальной задачей.

Одним из направлений исследований в этой области является изучение динамики изменения силы резания при изменении толщины среза. Известно [1], что сила резания изменяется с изменением толщины среза с некоторым отставанием. Отставанию (запаздыванию) силы резания от изменения толщины среза отводится важнейшее место среди причин, поддерживающих автоколебательный процесс в технологической системе (ТС), особенно при больших частотах вращения шпинделя [1-8]. Величина отставания во времени изменения силы резания к изменению толщины среза (фазовая характеристика силы резания) при обработке твердосплавными и быстрорежущими инструментами на традиционных скоростях резания составляет 3-5 мс, что соизмеримо с периодом автоколебаний 2-100 мс (100-800Гц) при резании в этих условиях [2].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для формализации процесса отставания составляющей силы резания  $P_z$  от изменения толщины среза  $a$ , определяющего динамику изменения силы резания в нестационарных процессах резания, В.А. Кудинов [1] предложил возникающий переходной процесс при постоянном переднем угле  $\gamma$  описывать аperiодическим звеном первого порядка с помощью выражения в операторной форме

$$P \approx P_0(a) \frac{1}{1 + T_p \cdot s}, \quad (1)$$

где  $s$  – оператор Лапласа. Параметр  $T_p$  называют постоянной времени стружкообразования. Его физический смысл для различных законов изменения толщины среза  $a$  различный. Если  $a$  изменяется по синусоидальному закону с частотой  $f$ , то  $T_p$  связан со сдвигом фазы в единицах времени  $\Delta\tau$  (время изменения  $P_z$ ) по отношению к  $a$  соотношением

$$T_p = \frac{\tan(2\pi\Delta\tau f)}{2\pi f}. \quad (2)$$

Отсюда видно, что при  $\Delta\tau f \rightarrow 0$   $T_p \approx \Delta\tau$ .

Если  $a$  изменяется скачкообразно, как, например, при врезании, то интегрирование выражения (1) дает

$$P_z = P_{z0} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{T_p}} \right). \quad (3)$$

Из этого выражения следует, что в этом процессе  $T_p$  численно равно времени, за которое сила резания  $P_z$  становится равной  $(1-1/e)P_{z0} \approx 0,632P_{z0}$ , где  $P_{z0}$  – величина силы резания, соответствующая силе резания установившегося (после стабилизации) процесса резания.

М.Е. Эльясберг [3], в развитие работ S. Doi & S. Kato [6], для определения времени запаздывания силы резания по отношению к толщине среза  $\Delta\tau$ , связанного с постоянной времени стружкообразования  $T_p$ , предложил выражение

$$\Delta\tau = T_p \cdot \ln \left( \frac{1}{\delta_{T_p}} \right), \quad (4)$$

где  $\delta_{T_p}$  – относительная погрешность расчета постоянной времени запаздывания. Например, если  $\Delta\tau=0,13$  мс, то по формуле (4) при  $\delta_{T_p}=1,3\%$  получаем  $T_p = 0,03$  мс.

Очевидно, что постоянная времени стружкообразования  $T_p$  является общей характеристикой динамического процесса изменения силы в условиях нестационарного резания.

Установлено, что отставание силы резания от толщины среза обусловлено как инерционностью процессов в зоне первичных и вторичных деформаций [1], так и запаздыванием формирования площадки контакта на передней поверхности [9]. И.Г. Жарков на

основании проведенных экспериментальных исследований полагает [2], что непосредственное влияние на  $\Delta\tau$  оказывает лишь коэффициент утолщения стружки  $K_a$ :

$$\Delta\tau = -1 + 2,6 \cdot K_a. \quad (5)$$

Обобщая экспериментальные исследования, В.А. Кудинов доказал, что  $T_p$  прямо пропорциональна толщине стружки и обратно пропорциональна скорости резания  $V$ :

$$T_p = \frac{m}{n} \cdot \frac{a \cdot K_a}{V}, \quad (6)$$

где  $m/n$  – коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Экспериментальное изучение динамики изменения силы резания и ее отставания от изменения толщины среза весьма сложно, а часто практически и невозможно из-за необходимости одновременной регистрации изменения и силы, и перемещения вершины лезвия во времени в миллисекундном масштабе с минимальным влиянием свойств технологической системы. Часто при экспериментальных исследованиях не учитывается демпфирующая способность измерительного оборудования и инструмента, например, державки резца при точении [7], что приводит к значительному разбросу значений постоянной времени стружкообразования  $T_p$ , полученных в результате исследований, проведенных для примерно одинаковых условий в различных лабораториях и в различное время (табл.1). Видно, что численные величины  $T_p$  могут отличаться более чем в 10 раз. Анализ показывает, что в указанных работах исследовалось влияние на  $T_p$  лишь скорости резания, толщины среза, переднего угла и марки обрабатываемого материала часто при толщинах среза более 0,15 мм. Этот ограниченный перечень влияющих факторов и относительно большая толщина среза свидетельствуют о все еще ограниченных возможностях экспериментальных методов, обеспечивающих достаточно высокую точность определения  $T_p$ .

*Таблица 1 – Экспериментальные данные о  $T_p$  по данным различных исследований при обработке: сталь 45;  $V=60$  м/мин;  $\gamma=0^\circ$ ,  $\alpha=12^\circ$ ; \*малоуглеродистая сталь;  $V=60$  м/мин;  $\gamma=0^\circ$ ; \*\* AL7050,  $V=1000$  м/мин*

Автор	a, мм	Характеристика переходного процесс		$T_p$ , мс
		Название по оригиналу работы	Значение	
*S. Doi & S. Kato [6]	0,05	Запаздывание силы резания	0,02 мс	0,02
Кудинов В.А. [1]	0,05	Постоянная времени стружкообразования	0,06 мс	0,06
Эльясберг М.Е. [3]	0,05	Запаздывание силы резания	0,13 мс	0,03
Жарков И.Г. [2]	0,15	Фазовая характеристика силы резания	2,0 мс	2,0
Кедров С.С. [4]	0,5	Постоянная времени стружкообразования	0,18 мс	0,18
**Brecher С. [7]	0,1	Сдвиг фаз	$\left[ \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3} \right]$	0,4-0,8

Задача исследования влияния на динамику изменения силы резания таких факторов, как радиус округления режущей кромки  $\rho$ , свойств инструментальных материалов, в том числе и износостойких покрытий на режущем лезвии, фаски износа  $hz$ , условий трения на контактных поверхностях лезвия при толщинах среза менее 0,15 мм, которые имеют место во многих реальных процессах, например, при фрезеровании, может быть решена с помощью имитационного моделирования процесса резания, например, методом конечных элементов (МКЭ). Такой подход, по нашему мнению, позволяет получить максимальный объем информации об исследуемом процессе с минимальными затратами средств и времени, исключив при этом влияние на исследуемый процесс всех посторонних факторов.

Поэтому целью данной работы являлось исследование влияния элементов режима резания, геометрии инструмента, коэффициента внешнего трения на постоянную времени стружкообразования при обработке различных материалов.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использовалась конечно-элементная (КЭ) модель процесса прямоугольного свободного резания твердосплавным инструментом, разработанная на основе решателя LS-DYNA методом явного интегрирования по времени с применением модели трения Кулона с ограничением максимальных касательных напряжений в зависимости от контактной температуры и напряженно-деформированного состояния (НДС) прирезцовых слоев стружки, а также разрушения перед режущим лезвием на основе физического (величина пластических деформаций и напряжений) и геометрического критериев. Вычислительная процедура реализована в специальном модуле OCFEM в соответствии с принятыми граничными и начальными условиями, а также допущениями [10].

Динамика изменения силы резания при переходных процессах в данной работе рассматривалась с точки зрения формализации В. А. Кудинова. В качестве меры отставания силы резания по отношению к толщине среза использовалась постоянная времени стружкообразования  $T_p$  относительно проекции составляющей силы резания  $P_z$ . Для ее определения рассматривали процесс со скачкообразным изменением толщины среза – процесс врезания лезвия при прямоугольном свободном резании в абсолютно жесткой технологической системе.

Закон изменения силы резания в этом случае (при постоянных прочих параметрах процесса) может быть представлен аналитической зависимостью (3). В этом выражении две константы:  $P_{z0}$  и  $T_p$ . Найти эти неизвестные константы можно в результате аппроксимации методом наименьших квадратов диаграммы изменения силы резания при врезании, полученной в результате имитационного моделирования рассматриваемого процесса резания (см. рис. 1). В работе эта процедура выполнялась с помощью средств, предоставляемых пакетом MatLAB.

В работе рассмотрены пять обрабатываемых материалов: сталь 45 – ГОСТ 1050-88, сталь 3 – ГОСТ 380-94, сталь 40Х – ГОСТ 4543-71, сталь 20Х13 – ГОСТ 5632-72, сталь 12Х18Н10Т – ГОСТ 5632-72. Этот перечень материалов сформирован таким образом, чтобы обеспечить изменение предела прочности  $\sigma_s$  при примерно постоянном относительном удлинении и изменение относительного удлинения  $\delta$  при примерно постоянной прочности  $\sigma_s$ .

Для учета механических свойств были экспериментально определены по стандартным методикам зависимости истинных напряжений  $\sigma_s$  от величины пластических деформаций  $\epsilon_p$  при одноосном растяжении при нормальной температуре и коэффициент влияния температуры на указанную зависимость.

Параметры модели Купера-Саймонда по влиянию скорости деформации на указанную зависимость принимались по данным, опубликованным в литературе [11]. Основные сведения об обрабатываемых материалах представлены на рисунке 2.

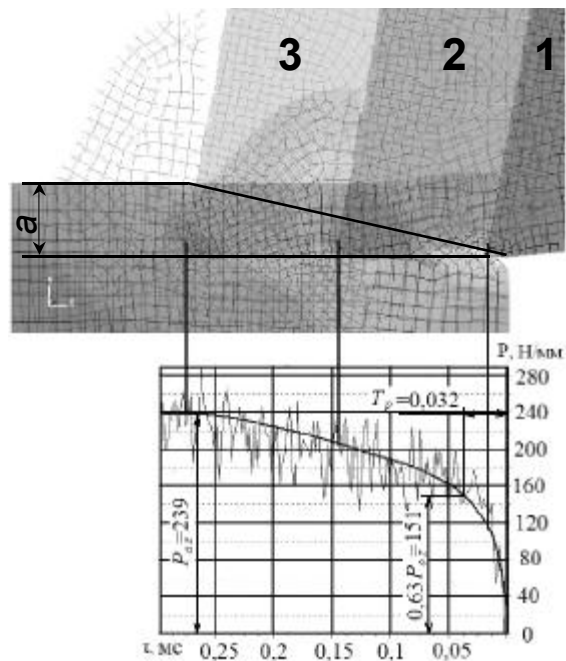


Рисунок 1 – Три последовательных положения лезвия при врезании и соответствующая диаграмма изменения силы резания

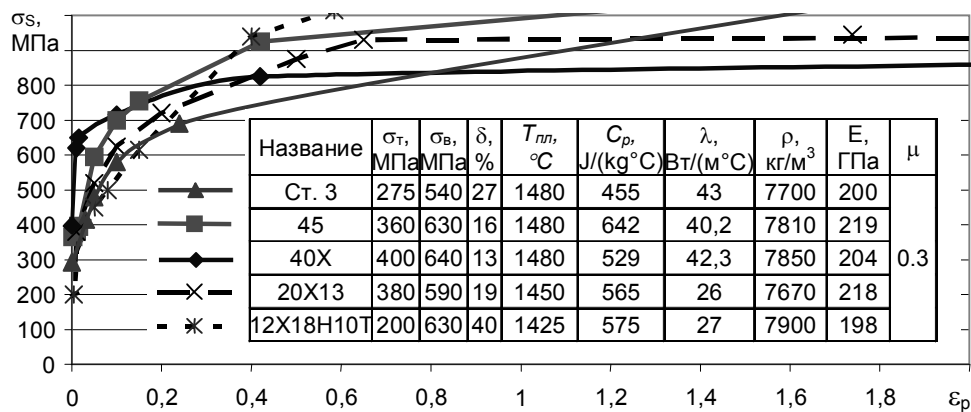


Рисунок 2 – Диаграмма растяжения в истинных напряжениях и физико-механические свойства обрабатываемых материалов

В качестве инструментального материала был использован твердый сплав Т15К6. Поскольку его модуль упругости более чем в два раза больше модуля упругости обрабатываемого материала, то резец был принят абсолютно жестким. Термомеханические свойства инструментального материала:  $E=580$  ГПа,  $\mu=0,3$ ,  $\rho =11200$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_p=242$  J/(kg·°C),  $\lambda=27,2$  Вт/(м·°C).

Критериями разрушения приняты геометрический критерий, равный во всех случаях  $\Delta L=0,1a$ , и физический критерий -  $\varepsilon=2,5$  [10]. Исследования проводились при длине резания 20а.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования влияния различных факторов на постоянную времени стружкообразования с помощью разработанной имитационной модели представлены на рис. 3. Исследования с помощью имитационного моделирования выполнялись методом однофакторного эксперимента варьированием одного исследуемого фактора при постоянных других факторах для всех пяти материалов. Анализ всех приведенных данных показывает, что марка материала больше влияет на абсолютную величину показателя, нежели на характер зависимости. Сопоставляя полученные зависимости со свойствами исследованных обрабатываемых материалов (рис. 2), можно заметить, что основное влияние на  $T_p$  оказывает относительное удлинение  $\delta$ , характеризующее склонность материалов к деформационному упрочнению, в то время как предел прочности на величину  $T_p$  практически не влияет. Например, относительное удлинение стали 12X18H10T  $\delta=40\%$ , а стали 40X  $\delta=13\%$  при примерно их одинаковой прочности. В то же время постоянные времени стружкообразования для этих сталей при  $V=100$  м/мин соответственно равны  $T_p=0,08$  с<sup>-1</sup> и  $T_p=0,01$ с<sup>-1</sup>, т.е. различаются в 8 раз (рис. 3а). Подобная картина характерна для всего диапазона рассмотренных условий: чем больше относительное удлинение материала, тем больше его постоянная времени стружкообразования.

Основными параметрами режима резания, влияющими на  $T_p$  при прямоугольном свободном резании, являются скорость резания и толщина среза, причем скорость резания влияет в большей степени (рис. 3б). С увеличением скорости резания  $T_p$  уменьшается, причем наиболее интенсивно в диапазоне изменения скоростей резания от 50 до 200 м/мин. Такой характер зависимостей можно объяснить двумя факторами: во-первых, обратно пропорциональным увеличению скорости резания уменьшением времени прохода лезвия необходимого для стабилизации процесса стружкообразования расстояния, т.е. участка врезания, на котором имеет место переменная сила резания; во-вторых, охрупчиванием (скоростным упрочнением) обрабатываемого материала, т.е. уменьшением его пластичности. Последнее утверждение подтверждается тем, что для сталей, более склонных к скоростному упрочнению (например, для нержавеющей стали 12X18H10T), показатель степени при  $V$  больше по абсолютной величине, по крайней мере на 10%, по сравнению со сталями, не склонными к деформационному упрочнению (например, для углеродистой стали 40X).

Толщина среза  $a$  также существенно влияет на  $T_p$  (рис. 3б), причем эта зависимость существенно определяется величиной относительного удлинения обрабатываемого материала  $\delta$ . Чем больше величина относительного удлинения  $\delta$ , тем больше влияние толщины среза и больше абсолютная величина  $T_p$ . Например, увеличение толщины среза при обработке стали 40X (при прочих равных условиях) от 0,02 до 0,1 мм (т.е. в 5 раз) приводит к увеличению  $T_p$  с 0,007 до 0,012 мс (т.е. только в 1,7 раза), в то время как при обработке стали 12X18H10T при таком же изменении толщины среза  $T_p$  увеличивается с 0,025 до 0,3 мс (т.е. в 12 раз).

На это указывает и уменьшение показателя степени в степенных линиях тренда: 1,62 - для стали 12X18H10T и 0,48 - для стали 40X. Такая ситуация связана как с увеличением относительного удлинения обрабатываемого материала, так и с увеличением объема материала,

подвергаемого деформации в зоне стружкообразования в данный (текущий) момент времени с ростом толщины среза, а также ухудшением условий прогревания стружки, способствующего уменьшению прочности ее материала (рис. 4).

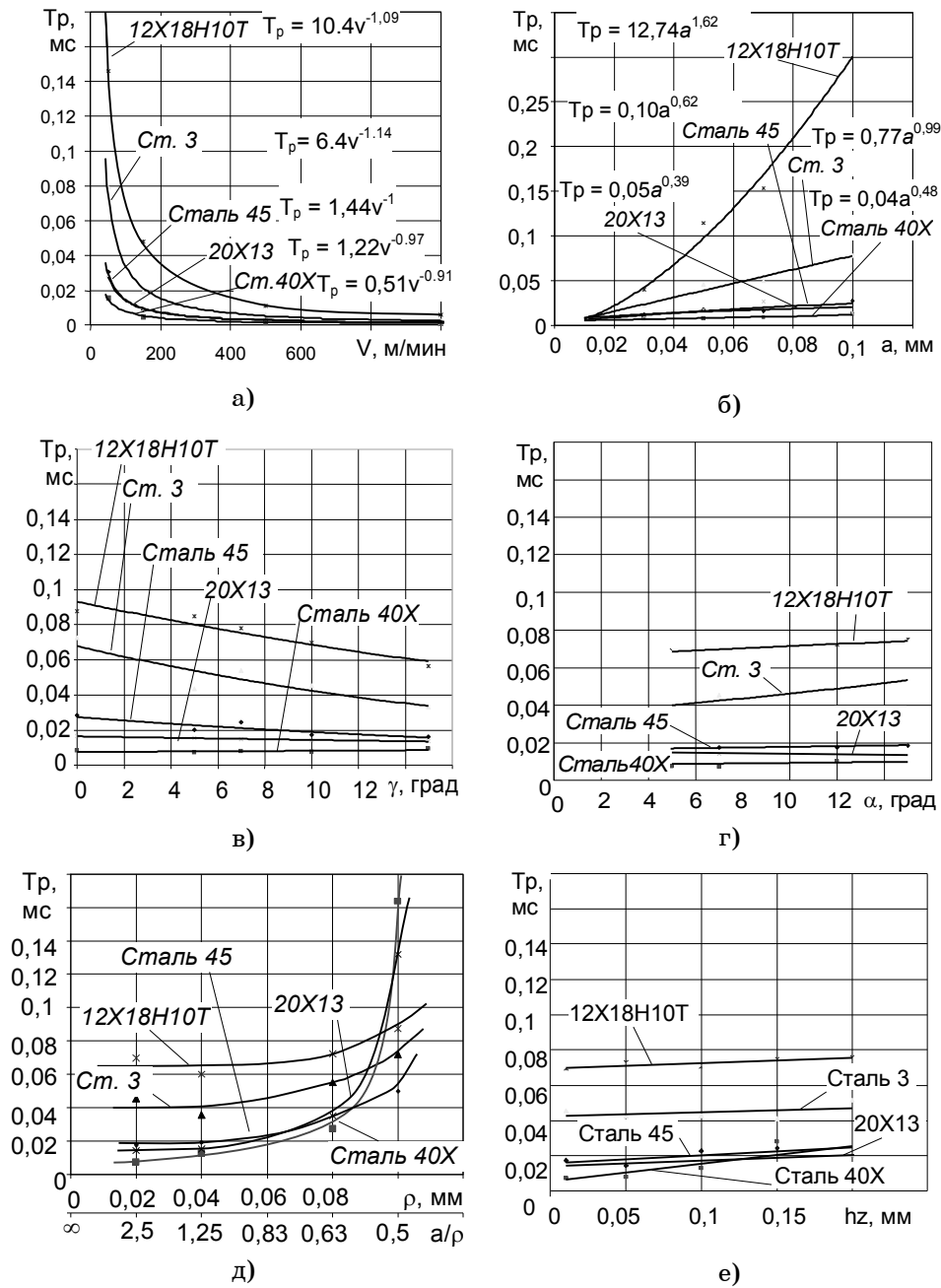


Рисунок 3 – Влияние различных факторов на постоянную времени стружкообразования. Базовый режим резания:  $V=100$  м/мин,  $a=0,05$  мм,  $\gamma=10^\circ$ ,  $\alpha=7^\circ$ ,  $h_z=0,01$  мм,  $\rho=0,02$  мм,  $f=0,28$

Влияние геометрии режущего лезвия также усиливается с увеличением относительного удлинения обрабатываемого материала.

С увеличением переднего угла  $\gamma$  постоянная времени стружкообразования уменьшается (рис. 3в). Но если для стали 40Х увеличение  $\gamma$  с  $0^\circ$  до  $14^\circ$  приводит к уменьшению  $T_p$  не более чем на 5%, то для стали 12Х18Н10Т это уменьшение составляет уже 66%. Это еще раз подтверждает тот факт, что уменьшение объема деформируемого материала в зоне стружкообразования способствует уменьшению  $T_p$ .

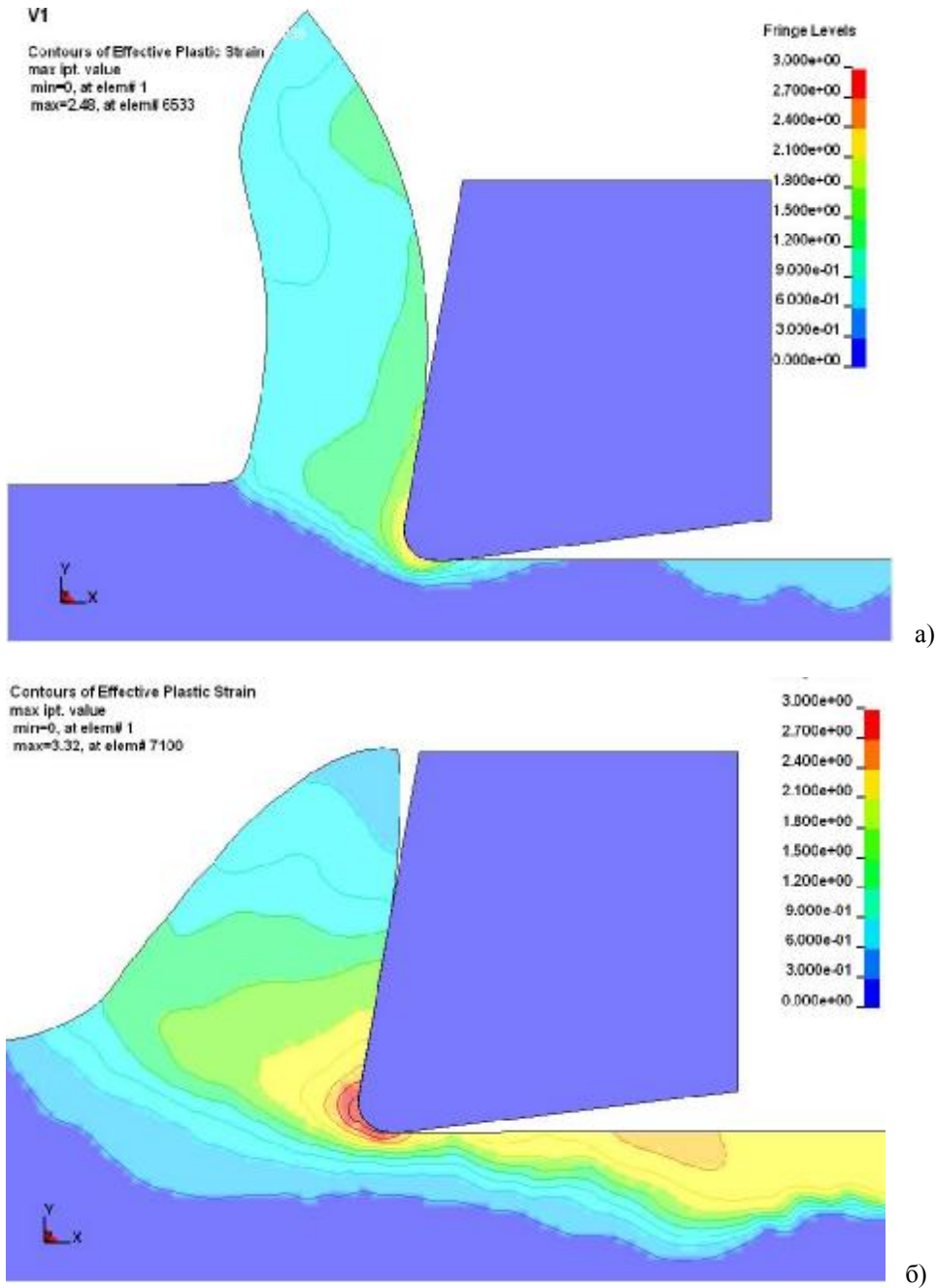


Рисунок 4 – Форма зоны стружкообразования в момент времени  $\tau = 0,5332$  с при обработке стали 40Х (а) и стали 12Х18Н10Т (б) с режимами  $V = 100$  м/мин,  $a = 0,05$  мм,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $h_z = 0,01$  мм,  $\rho = 0,02$  мм,  $f = 0,28$



Вместе с тем следует отметить, что при малых передних углах возрастает разница между значениями  $T_p$  для сталей 45 и 20X13. Известно [12], что при обработке нержавеющей сталей средний коэффициент трения возрастает. Поэтому именно изменением условий контактного взаимодействия и можно объяснить указанный факт.

Заметным является влияние радиуса округления режущей кромки  $\rho$  (рис. 4д). При прочих равных условиях к существенному увеличению  $T_p$  приводит увеличение радиуса округления режущей кромки при соотношениях  $a/\rho$  примерно меньше 1, причем наиболее существенное увеличение  $T_p$  выявляется при уменьшении соотношения  $a/\rho$  менее 0,63. Это критическое значение тем меньше, чем больше относительное удлинение обрабатываемого материала  $\delta$ . Так, для стали 40X критическое значение  $a/\rho$  составляет 0,63 (рис. 4д), а для стали 12X18H10T, имеющей большее относительное удлинение, - 0,5 мм. Наблюдаемое явление связано с ухудшением условий стружкообразования, а также увеличением доли проскальзывания (т.е. перемещения инструмента в контакте с заготовкой без образования стружки) и, следовательно, с увеличением времени, необходимого для стабилизации процесса.

Существенного влияния заднего угла  $\alpha$  (рис. 3г) и фаски износа на задней поверхности  $h_z$  выявлено не было (рис. 3е), и наблюдаемые изменения (максимально на 20% для стали 3) очевидно связаны с незначительным влиянием на силу резания сил, действующих на задней поверхности лезвия. Это можно отнести к недостаткам принятой модели. Учитывая то, что на практике  $\alpha$  и  $h_z$  все же оказывают заметное влияние на силу резания, их влияние на  $T_p$  необходимо в будущем исследовать более детально с помощью модели, способной прогнозировать силы на задней поверхности с минимальной погрешностью.

Интересным является влияние среднего коэффициента трения  $f$  на  $T_p$  (рис. 5). Общая тенденция показывает увеличение  $T_p$  с ростом коэффициента трения  $f$ .

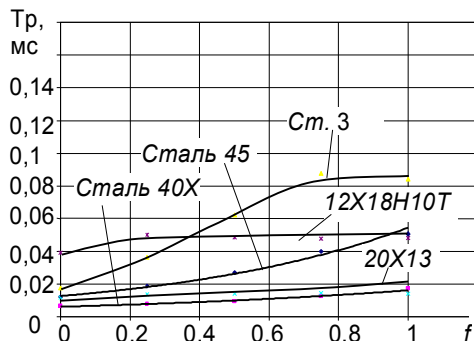


Рисунок 5 – Влияние среднего коэффициента трения на  $T_p$

Влияние  $f$  тем больше, чем больше его величина. Однако для сталей с большим относительным удлинением  $\delta$  при определенных значениях  $f$  наблюдается стабилизация в изменении  $T_p$ . Например, максимальное значение  $T_p$  для стали 3 наступает при  $f=0,7$ , а для стали 12X18H10T – при  $f=0,25$ . Это связано, по-видимому, с увеличением объема пластических деформаций в зоне стружкообразования с увеличением относительного удлинения  $\delta$  обрабатываемого материала, т.е. с увеличением его пластичности и соответственно коэффициента внутреннего трения на участке контакта стружки с передней поверхностью, характеризуемого так называемой застойной зоной и,

следовательно, его насыщением (стабилизацией) при указанных критических значениях  $f$ . Причем это насыщение наступает при тем меньших  $f$ , чем больше относительное удлинение.

Количество экспериментальных данных о величине  $T_p$  весьма ограничено, что связано со сложностью измерения этого показателя процесса из-за существенного вклада в измеряемую величину динамических явлений во всех элементах технологической системы. Поэтому известные опыты проводились при значительных толщинах среза (как правило, свыше 0,15 мм), при относительно малых скоростях резания (до 120 м/мин) с ограниченным перечнем обрабатываемых материалов. Вместе с тем сравнение даже этих известных экспериментальных данных (табл. 1 и рис. 6) с данными, полученными в результате имитационного моделирования, показывает достоверность полученных модельных результатов как по абсолютной величине ( $T_p$  имеет порядок 0,01-0,1 мс для примерно одинаковых толщин среза (табл. 1)), так и по характеру полученных зависимостей, например, с увеличением скорости резания  $T_p$  убывает как в эксперименте, так и при моделировании (рис. 6) в исследованном диапазоне скоростей резания.

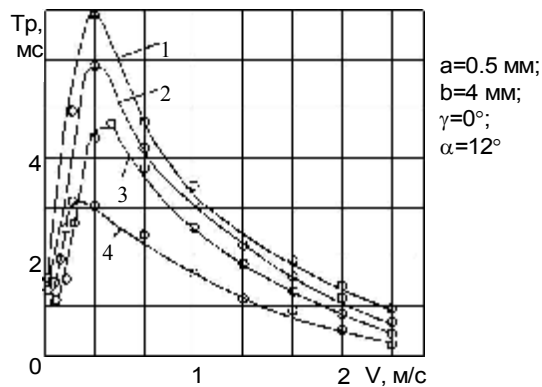


Рисунок 6 – Влияние скорости резания на постоянную времени стружкообразования[2]: 1 – сталь 08X15H5Д2Т; 2 – сталь 12X18H9Т; 3 – сталь 45; 4 – сплав ВТ9

Экспериментально подтверждается и увеличение  $T_p$  с увеличением толщины среза. Например, Г. И. Жарков установил, что при обработке жаропрочных и нержавеющей сталей при увеличении толщины среза от 0,15 до 0,6 мм  $T_p$  увеличивается более чем в 2 раза, что вполне согласуется с полученными данными выполненного имитационного моделирования.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования дают авторам данной работы возможность утверждать, что постоянная времени стружкообразования является универсальной характеристикой переходного процесса. В связи с этим целесообразно описание процесса отставания изменения силы резания по отношению к изменению толщины среза представлять аperiодическим звеном первого порядка.

Таким образом, в результате имитационного моделирования процесса прямоугольного свободного резания установлено, что условия реализации процесса существенно влияют на величину  $t_p$ . Из всех исследованных условий резания наиболее существенное влияние оказывают скорость резания, толщина среза, передний угол, радиус округления режущей кромки и коэффициент трения. Основным механизмом влияния скорости резания в исследованном диапазоне ее величин является обратно

пропорциональное изменение времени стабилизации процесса стружкообразования при малом изменении соответствующего пути резания. Вместе с тем влияние всех указанных пяти параметров также связано с изменением объема деформируемого металла в зоне стружкообразования и объема пластических деформаций в ней. Поэтому обнаруженное влияние относительного удлинения  $\delta$ , которое определяет характер кривой течения обрабатываемого материала и его пластические свойства, на величину  $t_p$  и характер ее зависимости от условий резания является вполне закономерным.

Полученные данные моделирования вполне согласуются с результатами экспериментов, которые опубликованы в литературе. Вместе с тем по сравнению с экспериментальными исследованиями предложенный подход позволил существенно расширить количество параметров процесса, влияние которых на  $t_p$  может быть изучено. В частности, впервые установлено, что  $t_p$  значительно увеличивается при уменьшении величины  $a/\rho$  меньше критического значения, и что это критическое значение уменьшается с увлечением относительного удлинения обрабатываемого материала.

Сложности прогнозирования сил на задней поверхности лезвия не позволили в данном исследовании однозначно заключить, что задний угол  $\alpha$  и фаска износа на задней поверхности  $h_z$  влияют на  $t_p$  несущественно.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение влияния этих и других условий резания не только при прямоугольном свободном резании, но и в условиях реальных, как правило, нестационарных, рабочих процессов обработки резанием.

## SUMMARY

### FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CUTTING FORCE DYNAMICS

V.A., Zaloha, D.V. Kryvoruchko, M.G. Storchak\*, S.S. Emelyanenko, S.N. Selivonenko  
Sumy State University

\*Shtutgart University, Germany

*A cutting force time delay with uncut chip thickness variation is one of the five reasons of chatter excitation during the most of machining operations. Experimental investigations of cutting variables, tool geometry, workpiece materials and others factors influences on the chip formation time (CFT) constant have not been carried out in wide range of cutting conditions yet. This results from imperfections of both experimental methods and measurement apparatuses.*

*In the paper an approach to investigation of cutting force time delay by finite element modeling will be proposed. Finite element orthogonal cutting model which allows simulation of chip formation at the stage of tool entrance and stepwise uncut chip thickness variation is developed based on LS-DYNA solver. An analysis of cutting speed, rake angle, tool edge radius, uncut chip thickness, friction, work material characteristics influences on CFT constant will be represented and its comparison with known experimental data will be given.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В. А. Динамика станков. -М.: Машиностроение, 1967. -367 с.
2. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. -Л.: Машиностроение, 1986. -184 с.
3. Эльясберг М. Е. Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика. – СПб: ОКБС, 1993. –180 с.
4. Кедров С. С. Колебания металлорежущих станков. -М.: Машиностроение, 1978. -198 с.
5. Афонина Н. А. Повышение виброустойчивости процесса токарной обработки на основе управляемых колебаний скорости резания: Дисс. ... канд. техн. наук:05.03.01. – Тула, 2004. –156 с.
6. Doi S., Kato S. Chatter vibration of lathe tools//Trans. ASME. – 1956. – № 78. – P.1127 – 1134.

7. Brecher C., Witt S., Esser M. Simulation of the Process Stability of HPC Milling Operations under Consideration of the nonlinear Behaviour of the Machine Tool and the Cutting Process//Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. – 2007. – P. 345–342.
8. Wiercigroch B.M., Budak E. Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting // The Royal Society. –2001. – № 359. –P. 663–693.
9. Ташлицкий Н.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов//Вестник машиностроения. – 1960. – № 2. – С. 10–20.
10. Heisel U., Krivoruchko D.V., Zaloha V.A., Storchak M. Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances//Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. - Calabria, 2007. – P. 141–148.
11. Криворучко Д.В., Залого В.А., Хвостик С.Н. О выборе уравнения состояния обрабатываемого материала для моделирования процесса резания методом конечных элементов//Вестник СумГУ. –2006. – № 56. – С. 92-101.
12. Развитие науки о резании металлов/Н.Н. Зорев, Г.И. Грановский, М.Н. Ларин и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 415 с.

**В.А. Залого**, д-р. техн. наук, СумГУ, г. Сумы;  
**Д.В. Криворучко**, д-р техн. наук, СумГУ, г. Сумы;  
**М.Г. Сторчак**, канд. техн. наук, Университет  
 Штутгарта, г. Штутгарт, Германия;  
**С.С. Емельяненко**, СумГУ, г. Сумы;  
**С.Н. Селивоненко**, СумГУ, г. Сумы;

*Поступила в редакцию 25 сентября 2008 г.*