УДК 534.1

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ РЕЗЦА ПРИ ПРЯМОУГОЛЬНОМ СВОБОДНОМ РЕЗАНИИ

© Владимир Константинович Асташев,
Георгий Константинович Корендясев
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
korenduba@gmail.com

Аннотация. *Приводятся результаты конечноэлементного исследования автоколебаний, возникающих при обработке металлов резанием на основе гипотезы о термомеханической природе этого явления. Моделированием обнаружены эффекты самовозбуждения и установления автоколебаний, выявлены условия склонности к возникновению автоколебаний для различных материалов. Производится анализ влияния свойств технологической системы, параметров режима резания, а также свойств обрабатываемого материала на характер автоколебательного процесса.*

Ключевые слова. *автоколебания, термомеханическая модель, падающая характеристика силы резания, конечноэлементная модель.*

Введение. В работе [1] предложена термомеханическая модель возбуждения автоколебаний при резании. В основе этой модели лежит предположение о том, что возникновение автоколебаний связано с зависимостью механических характеристик материала, его модуля упругости, пределов текучести и прочности, а следовательно и силы резания от температуры. Учет уменьшения силы резания с ростом температуры позволяет вскрыть взаимосвязи, возникающие в процессе резания, и превращает систему «резец-заготовка» в автоколебательную систему с отрицательной диссипацией.

Предложенная в [1] термомеханическая модель дает наглядное качественное описание и понимание явления возбуждения термомеханических автоколебаний. Однако, принятые при ее построении и решении предпосылки и допущения, хотя и построенные с учетом известных экспериментальных данных, нуждаются в уточнениях и детализациях, учитывающих реальные условия контакта режущего инструмента и заготовки, характер теплоотвода в заготовку, резец, стружку и окружающую среду. В настоящей работе представлены результаты конечноэлементного моделирования термомеханических автоколебаний применительно к процессу прямоугольного свободного резания.

Формирование конечноэлементной модели процесса прямоугольного свободного резания. Задача решалась в двумерной постановке с помощью программы abaqus explicit (student edition) с использованием явного метода интегрирования уравнений динамики.

Исходными данными для моделирования являются:

а) модели материалов заготовки и инструмента;

б) модель трения между поверхностями инструмента и заготовки;

в) модель стружкоотделения;

г) геометрия инструмента и заготовки.

При моделировании использовалась идеальная упруго пластическая модель обрабатываемого материала. Данные по зависимости модуля упругости и предела текучести обрабатываемого материала от температуры заимствованы из

источников [2,3]. В качестве материала заготовки выбрана сталь AISI 1045. Необходимые для моделирования свойства этой стали в зависимости от температуры приведены в табл. 1.

Инструмент предполагается абсолютно жестким, поэтому его материал описывался лишь термодинамическими параметрами и плотностью. В качестве инструментального материала был выбран твердый сплав H10F, обладающий следующими свойствами: плотность ρ=14500 кг/м^3; коэффициент линейного теплового расширения α=5,4·10^{-6}; теплоемкость C_p=400 Дж/(кг·°С); теплопроводность H=50,Вт/(м·°К)

Процесс трения передней поверхности обрабатывающего инструмента со стружкой и задней поверхности инструмента с заготовкой является одним из малоизученных процессов, сопровождающих процесс резания.

Таблица 1. Свойства стали.

Температура T, °С	20	200	400	600	1800
Модуль упругости E, гПа	215	210	165	160	0
Коэффициент Пуассона, ν	0,3				–
Предел текучести σ_T, мПа	400	340	300	160	0
Удельная теплоемкость Cр, Дж/(кг °С)	461				
Теплопроводность H, Вт/(м °К)	23	23,5	25,5	26,5	30
Плотность ρ, кг/м^3	7750				
Коэффициент линейного теплового расширения α, 10^{-5}	1,2				

При конечноэлементном моделировании процесса резания обычно используют кулоновскую модель трения $\tau = \mu\sigma$ (где τ – напряжение сдвига в контакте, σ – нормальное напряжение в контакте, μ – коэффициент трения) в связи с ее исключительной простотой. Значение μ выбирается обычно априорным образом и является основным источником ошибок, возникающих в задачах по определению силы резания. На основании обзора литературы значение коэффициента трения на контактных площадках «инструмент – стружка» и «инструмент – заготовка» было выбрано μ=0.2.

Важной задачей является выбор критерия стружкоотделения. Существует значительное количество численных алгоритмов стружкоотделения. Данные алгоритмы могут быть разделены на две основные категории.

Первая группа – это алгоритмы, основанные на геометрических предположениях. Суть данных алгоритмов заключается в создании геометрического условия разделения узлов сетки между изделием и стружкой. В силу того, что условие стружкоотделения выбирается исключительно из геометрических соображений, данный тип алгоритма не может отражать реальной физики процесса стружкоотделения и использовался в основном в ранних работах по конечноэлементному моделированию процесса резания [4].

Вторая группа – это алгоритмы, основанные на физических критериях разрушения материала заготовки. В качестве этих критериев могут выступать критические значения напряжений, деформаций, а также энергии деформации. Как правило, эти значения можно почерпнуть из результатов испытаний материалов. Данные алгоритмы достаточно достоверно описывают физические процессы, происходящие в зоне образования стружки. В настоящей работе в качестве критерия разрушения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку.

При моделировании приняты следующие геометрические параметры процесса, инструмента и заготовки: глубина резания 2 мм; ширина среза 3 мм; передний угол инструмента 10°; задний угол инструмента 5°.

В модели использованы 4-х узловые элементы CPE4RT с использованием опции «*distortion control*» для сохранения качества сетки при значительных пластических деформациях материала заготовки. Сетка уплотнялась вблизи зон ожидаемого высокого градиента напряжений, деформаций и температур. Размер сетки выбирался таким образом,

что бы с одной стороны обеспечить достаточную точность расчета, а с другой стороны приемлемую размерность задачи.

Граничные условия модели приведены на рисунке 1. Заготовка движется с постоянной скоростью V навстречу инструменту. Инструмент с массой m соединен с неподвижным основанием упруго-диссипативной связью с коэффициентами жесткости c и вязкого сопротивления b и имеет возможность перемещения только вдоль оси X. Начальными условиями решения являются заданные начальная температура системы и скорость V заготовки, равная постоянной составляющей скорости резания.

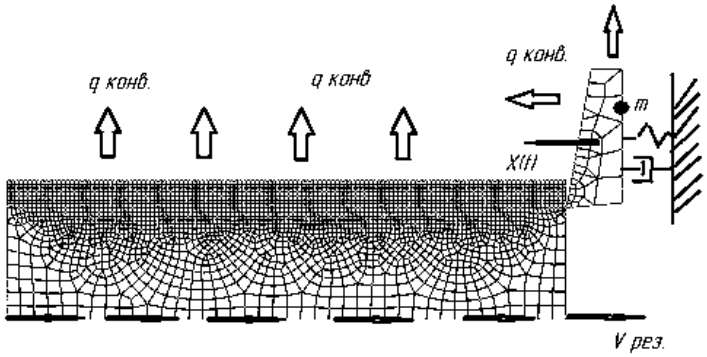


Рис. 1. Граничные условия модели.

Максимальный шаг интегрирования равен $\Delta t_{\max} = \min\left(L/c\right)$; где L – характерный размер конечного элемента, $c = \sqrt{E/\rho}$ – скорость продольной волны в материале изделия.

Анализ процесса термомеханических автоколебаний резца. Результаты моделирования подтвердили возможность возбуждения термомеханических автоколебаний. При определенных соотношениях механических и тепловых параметров обрабатываемого материала происходит самовозбуждение автоколебаний и их переход к установившимся периодическим режимам. На рис. 2 показан график изменения температуры на площадке контакта инструмента с деталью в процессе установления автоколебаний при врезании инструмента в материал. Видно, что в начале резания процесс сопровождается быстрым разогревом материала, и при температуре Θ≈200˚С происходит самовозбуждение автоколебаний, а затем и дальнейший переход к установившемуся режиму автоколебаний, сопровождающийся возрастанием как средней за цикл температуры, так и амплитуды ее циклического изменения.

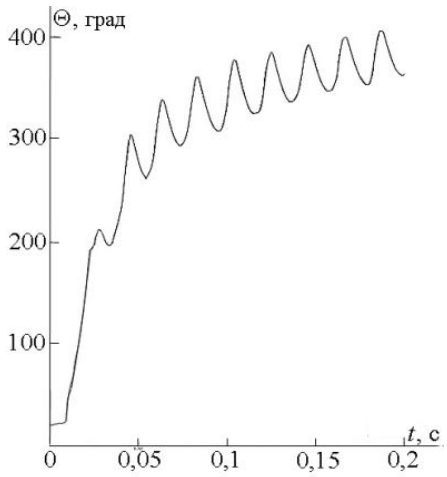


Рис. 2. График изменения температуры на площадке контакта инструмента с деталью в процессе установления автоколебаний при врезании инструмента в материал.

Анализ зависимости контактной температуры от времени показывает, что изменение температуры на контактной площадке за один период установившихся колебаний составляет

50° – 60°С, а в зоне сдвига до 100°С, что при средней температуре в зоне резания равной примерно 500°С приводит к изменению предела текучести в области сдвига на 10-15 мПа. Эти данные дают представление о том, насколько мощным источником возбуждения автоколебаний является разупрочнение материала заготовки при повышении температуры в зоне резания.

Следует отметить, что столь значительные колебания температуры происходят в достаточно малом объеме. На рис. 3 приведены картины распределения температур в зоне резания в двух фазах колебаний резца в установившемся режиме в моменты достижения температурой максимального (рис. 3,а) и минимального (рис. 3,б) значений. На рис. 3,б отчетливо видна локальная область высокой температуры в первичной зоне сдвига при формировании стружки. Именно предположение о подобной локализации и наличии границы резкого перепада температур этой области с окружающей средой являлось одним из основных допущений, принятых при построении математической модели [1].

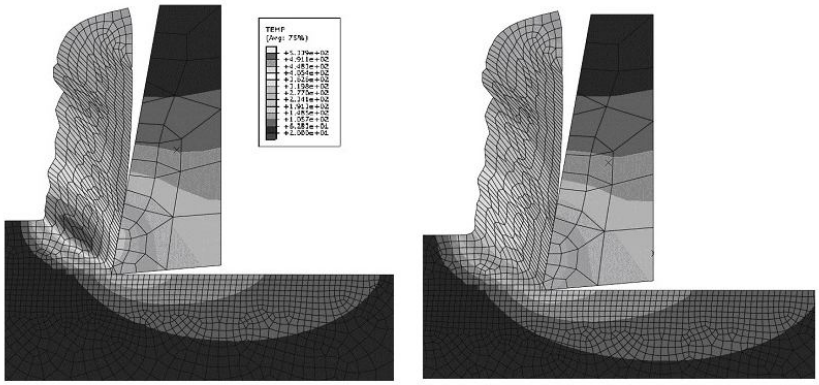


Рис.3. Картины распределения температур в зоне резания.

В ходе моделирования были получены графики (рис. 4,а) изменения основных параметров установившегося автоколебательного процесса от времени: 1 – смещение резца; 2 – относительная скорость резца и заготовки; 3 – сила резания; 4 – средняя температура в контакте резца и стружки. Для наглядности представленные кривые показаны в нормированном виде.

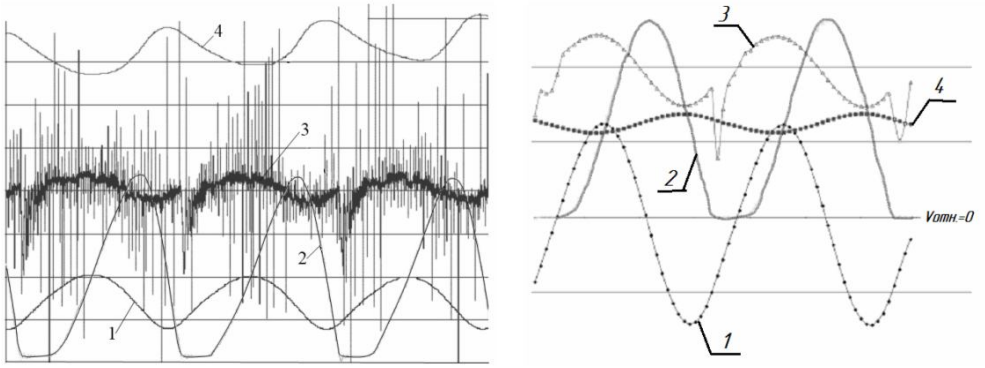


Рис.4. Графики изменения основных параметров установившегося автоколебательного процесса от времени.

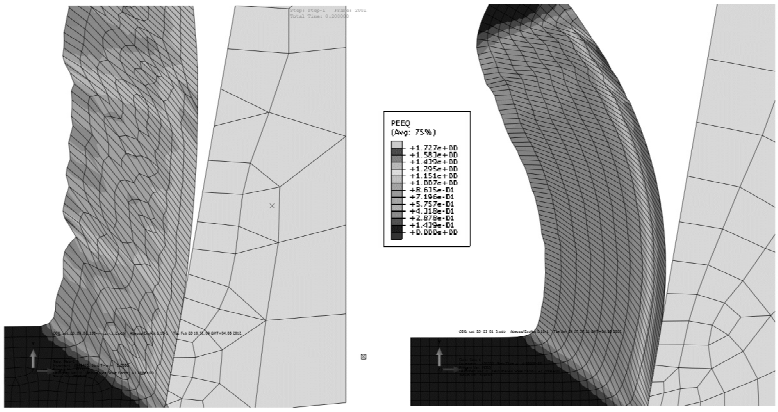
Колебания резца происходят с частотой собственных колебаний упругой системы по закону, близкому к гармоническому (кривая 1). Однако при движении в сторону движения изделия график относительной скорости резца (кривая 2) имеет участок, где эта скорость равна нулю, т.е. резец неподвижен относительно заготовки и его скорость в абсолютном движении равна скорости V изделия. Во время совместного движения упругая система резца запасает энергию, поступающую от привода заготовки, а затем, когда сила пружины

оказывается достаточной для преодоления сопротивления резанию, начинается встречное движение резца. Из сопоставления графика относительной скорости с графиком изменения температуры (кривая 4) видно, что при попутном движении и относительном останове температура в зоне резания уменьшается, а при встречном движении возрастает. Именно такое изменение температур и создает условия возникновения и поддержания автоколебаний.

Особое внимание следует уделить графику зависимости силы резания от времени (кривая 3). Сила резания в среднем отслеживает изменение температуры, однако ее график содержит дополнительные высокочастотные составляющие. По-видимому, они являются следствием дискретности элементов модели в зоне образования стружки. При достижении критической деформации происходит разрушение элемента, которое приводит к мгновенному изменению напряжений в указанной зоне, вызывающее высокочастотные колебания. Верность этого предположения подтверждается тем, что частота данных высокочастотных колебаний приблизительно равна частоте разрушения конечных элементов на контактной линии. Некоторый вклад в общую картину колебаний силы резания вносят и упругие колебания стружки.

Дополнительным подтверждением сказанного являются результаты (рис. 4,б), полученные с использованием упрощенной модели [5]. В этой модели предполагается, что сила резания создается в результате скольжения прямоугольного тела по плоскости, причем сила сопротивления скольжению зависит от температуры, подчиняясь законам зависимости от температуры механических характеристик обрабатываемого материала. Упрощенная модель не описывает процесс стружкообразования и этим, главным образом, отличается от представленной выше. Сравнение результатов моделирования, представленных на рис. 4,а,б, показывает практически полную тождественность процессов, происходящих в этих системах, за исключением отсутствия высокочастотных колебаний силы резания. Здесь интересно обратить внимание на наблюдаемый в обоих случаях характерный провал силы резания на границе перехода к участку относительного останова инструмента. Этот провал объясняется прохождением участков упругой разгрузки и нагружения пружины, соединяющей инструмент с неподвижным основанием.

Автоколебания весьма существенно влияют на форму стружки. Стружка приобретает специфическую волнообразную форму. Области значительных пластических деформаций, соответствующие движению резца навстречу заготовке, чередуются с относительно менее наклепанными зонами, соответствующими движению резца от заготовки. Число волн наклепа на стружке соответствует числу колебаний. На рис. 5 приведены для сравнения эпюры распределения эквивалентных пластических деформаций в стружке при резания в условиях наличия (рис.5,а) и отсутствия (рис.5,б) автоколебаний.



а *б*

Рис. 5. Влияние автоколебаний на характер пластических деформаций стружки.

Для оценки влияния скорости резания на характер автоколебательного процесса была проведена серия численных экспериментов. Скорость резания варьировалась 0,05 до 3 м/с. По результатам экспериментов было установлено, что зависимость амплитуды *A* автоколебаний от скорости *V* резания имеет экстремум в зоне средних скоростей (рис. 6), что согласуется с экспериментальными данными [6]. Результаты этого исследования весьма схожи с результатами подобного исследования упрощенной модели со сцеплением [5].

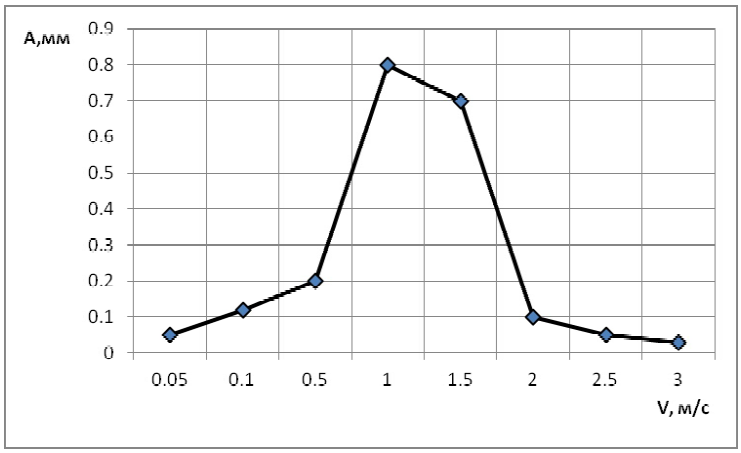


Рис.6 . Зависимость амплитуды *A* автоколебаний от скорости *V* резания.

Анализ влияния свойств обрабатываемого материала на процесс термомеханических автоколебаний. В данном разделе приведены результаты анализа влияния свойств обрабатываемого материала на характер автоколебательного процесса. Проводилось сравнение поведения автоколебательной системы при обработке стали, меди и алюминия. Механические и термодинамические свойства этих материалов при различных температурах [4,7,8] приведены в таблицах 1, 2, 3 соответственно.

Таблица 2 . Свойства меди

Температура *T*, □C	20	50	100	200	300	400	500
Модуль упругости E, гПа	120	125	125	110	82	50	35
Коэффициент Пуассона ν	0.35						
Предел текучести σ_T, мПа	300	310	312	270	205	130	85
Удельная теплоемкость *C*p, Дж/(кг □C)	400						
Теплопроводность *H*, Вт/(м □K)	210						
Плотность ρ, кг/м^3	9000						
Коэффициент линейного теплового расширения α,10^{-5}	5						

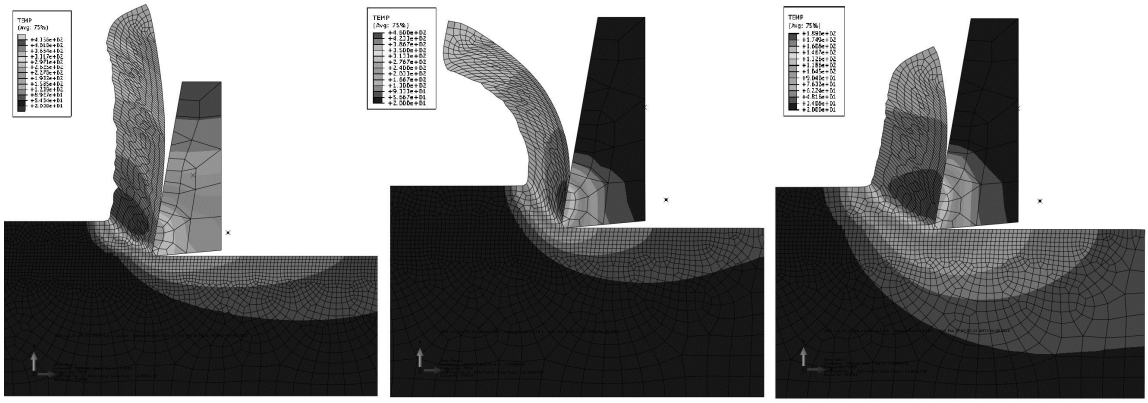
Таблица 3. Свойства алюминия.

Температура *T*, □C	20	50	100	200	300
Модуль упругости *E*, гПа	69	67	65	60	50
Коэффициент Пуассона ν	0.34				
Предел текучести σ_T, мПа	103	100	97	90	75
Удельная теплоемкость *C*p, Дж/(кг □C)	920				
Теплопроводность *H*, Вт/(м □K)	385				
Плотность ρ, кг/м^3	2700				
Коэффициент линейного теплового расширения α,10^{-5}	5				

Наиболее важным отличием данных материалов с точки зрения влияния на вибрацию при их обработке является различие в значениях модуля упругости E и предела текучести σ_T, определяющее величину силы резания.

Так при обработке стали при заданной геометрии системы и свойствах инструментального и обрабатываемого материалов средняя величина силы резания P_z оказывается равной 2500Н, меди – 1900Н, алюминия - 700Н. Очевидно, что при заданной жесткости обрабатывающего инструмента, его деформации существенно различаются при обработке материалов, имеющих столь разные значения. Выбранные нами материалы имеют ярко выраженную падающую характеристику $\sigma_T=\sigma_T(T)$, необходимую для возбуждения автоколебаний. Моделирование показывает, что автоколебания могут возбуждаться при обработке всех этих материалов в широком диапазоне скоростей резания. Амплитуда автоколебаний при прочих равных условиях имеет следующие максимальные значения: A_{max}= 0,8 мм при обработке стали; A_{max}= 0,5 мм при обработке меди; A_{max}= 0,2 мм при обработке алюминия. Моделирование проводилось при одинаковой геометрии резания.

Интерес представляет сравнение теплового поля, возникающего при обработке различных материалов в условиях термомеханических автоколебаний. На рис. 7,а,б,в показаны картины температурных полей при обработке стали, меди и алюминия. Причиной столь разного характера распределения температур является различие термодинамических параметров выбранных материалов, в первую очередь теплопроводностей. Как видно из рисунка, наибольший прогрев массива заготовки наблюдается при обработке алюминия, обладающего весьма высокой теплопроводностью. Наименьший прогрев заготовки соответствует обработке стали, имеющей низкий коэффициент теплопроводности.



а) Обработка стали *б) Обработка меди* *в) Обработка алюминия*

Рис.7. Сравнение теплового поля, возникающего при обработке различных материалов.

Понижение теплоемкости, так же как и повышение теплопроводности улучшает условия теплоотвода из зоны резания. При движении резца от заготовки в процессе установившихся автоколебаний, область сдвига успевает остыть. Это создает благоприятные условия для поддержания автоколебаний.

Однако, как уже говорилось выше, решающим фактором, определяющим виброустойчивость системы при обработке заданного материала, оказываются значения предела текучести σ_T и модуля упругости E и их зависимость от температуры.

Основные результаты исследования. Исследование конечноэлементной модели автоколебаний резца при прямоугольном свободном резании позволило проверить справедливость предположения [1]о термомеханической природе автоколебаний при резании и адекватность математической модели этого процесса. Характер полученных результатов согласуется с результатами натурных экспериментов [6] и результатами, полученными с использованием упрощенной модели [5] возбуждения автоколебаний при резании. Сформированные модели могут служить основой для выбора режимов резания, обеспечивающих минимальный уровень вибрации, а также могут использоваться при проектировании металлорежущего инструмента и оснастки. Понимание физического

механизма возбуждения автоколебаний как взаимосвязанного термомеханического процесса позволяет прояснить физический смысл явлений, лежащих в основе наиболее распространенных теорий возбуждения автоколебаний при резании [9-11].

Литература

1. Асташев В.К., Корендясев Г.К. Термомеханическая модель возникновения автоколебаний при резании // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. №3. С. 3-7.
2. Kalhori. Modelling and Simulation of Mechanical Cutting. Doctoral thesis. Lulea University of Technology. Sweden. 2001. 103 p.
3. Интернет база данных материалов MatWeb, http://www.matweb.com.
4. Komvopoulos, K. and Erpenbeck, S.A.. Finite Element Modeling of Orthogonal Metal Cutting // Trans. ASME J. Eng. Ind. 1991. V. 113. P: 253-267.
5. Корендясев Г.К. Конечноэлементное моделирование термомеханической модели автоколебаний при резании // Машиностроение и автоматизация. 2012. № 3. С.
6. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение. 1987. 184 с.
7. Kesharwani R. High temperature behavior of coopper. thesis for the Degree of Master of Science. National Institute of TechnologyRourkela-769008, Orissa, India, 2010.
8. Интернет ресурс http://www.engineeringtoolbox.com .
9. Каширин А.И. Исследование вибраций при резании металлов. М.-Л.: АН СССР. 1944. 282 с.
10. Эльясберг М.Е. Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика. СПб.: ОКБ станкостроения. 1993. 180 с.
11. Соколовский А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках. Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов. М.: Машгиз. 1958.

Поступила: 10.10.12.