МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАБОТКИ ШКИВОВ БЕССТУПЕНЧАТОЙ ТРАНСМИССИИ ПРИ СЛОЖНОЙ ТРАЕКТОРИИ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА В КОМПЛЕКСЕ ПРОГРАММ ANSYS

А. А. Генералова¹, А. А. Никулин², Д. С. Бычков³

^{1, 2, 3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия ¹ generalova_aa@mail.ru, ² artem.nikulin2003@yandex.ru, ³ deciptikon@mail.ru

Аннотация. Актуальность и цели. На этапе разработки технологического процесса токарной обработки детали важно определить процессы, происходящие в результате воздействия инструмента на заготовку. Величины напряжений, давлений, сил и температурных деформаций, возникаемых в результате воздействия резца, главным образом определяют свойства детали, полученной в результате обработки. Важнейшим шагом на этапе технологической проработки детали является моделирование процесса резания. Компьютерное моделирование позволяет полностью сымитировать процесс токарной обработки, учесть параметры вращения заготовки, режимы резания, силу тяжести и инерции заготовки в процессе вращения, вынужденные колебания и автоколебания, а также процесс стружкообразования. Цель исследования – разработка компьютерной модели при сложном пространственном перемещении режущего инструмента, позволяющей исследовать напряженно-деформированное и тепловое состояние процесса резания, условия стружкообразования, прогнозировать параметры качества поверхностного слоя, а также учитывать характеристики заготовки и режущего инструмента с последующей возможностью параметризации процесса. Материалы и методы. Теоретические и экспериментальные исследования базируются на геометрической и кинематической основе механики резания. С позиции кинематического подхода рассмотрены параметры режимов резания и сечения срезаемого слоя, координатные плоскости, углы режущего инструмента, а также характеристики деформации и скорости деформации срезаемого слоя. Для компьютерного моделирования использован конечно-элементный пакет Ansys Workbench, задача решалась в трехмерной постановке. Для моделирования пластической деформации и разрушения материала использована модель Джонсона – Кука, позволяющая учесть кинематическое упрочнение и адиабатический разогрев деформируемого материала. В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку. Результаты. Разработана компьютерная модель сложного перемещения режущего инструмента и разрушений вращающейся заготовки со стружкообразованием. Выводы. Полученные результаты компьютерной модели процесса точения и стружкообразования адекватны натурным исследованиям обработки.

Ключевые слова: моделирование обработки, численная модель, шкив, стружкообразование, поля напряжений, модель разрушения Джонсона – Кука

Для цитирования: Генералова А. А., Никулин А. А., Бычков Д. С. Моделирование обработки шкивов бесступенчатой трансмиссии при сложной траектории лезвийного инструмента в комплексе программ Ansys // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 1. С. 125–137. doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-10

[©] Генералова А. А., Никулин А. А., Бычков Д. С., 2025. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

SIMULATING MACHINING OF CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION PULLEYS IN COMPLEX BLADE TOOL TRAJECTORY IN ANSYS SOFTWARE PACKAGE

A.A. Generalova¹, A.A. Nikulin², D.S. Bychkov³

^{1, 2, 3} Penza State University, Penza, Russia

¹generalova_aa@mail.ru, ²artem.nikulin2003@yandex.ru, ³deciptikon@mail.ru

Abstract. Background. At the stage of developing the technological process of turning a part, it is important to identify the processes that occur as a result of the impact of the tool on the workpiece. The stresses, pressures, forces and temperature deformations resulting from the action of the cutter mainly determine the properties of the part obtained as a result of processing. The most important step at the stage of technological development of a part is the modeling of the cutting process. Computer modeling allows you to fully simulate the turning process, take into account the parameters of the workpiece rotation, cutting modes, gravity and inertia of the workpiece during rotation, forced vibrations and self-oscillations, as well as the chip formation process. The purpose of the study is to develop a computer model for complex spatial movement of a cutting tool, which makes it possible to study the stress-strain and thermal state of the cutting process, chip formation conditions, predict the quality parameters of the surface layer, and also take into account the characteristics of the workpiece and the cutting tool, with the subsequent possibility of parameterizing the process. Materials and methods. The theoretical and experimental studies carried out in the work are based on the basic principles of cutting theory, materials science, and material resistance. The virtual simulation was carried out in the Ansys Workbench software package. Results. A computer model of the complex movement of a cutting tool and the destruction of a rotating workpiece with chip formation has been developed. Conclusions. The obtained results of the computer model of the turning and chip forming process are adequate to field studies of processing.

Keywords: processing modeling, numerical model, pulley, chip formation, stress fields, Johnson – Cook fracture model

For citation: Generalova A.A., Nikulin A.A., Bychkov D.S. Simulating machining of continuously variable transmission pulleys in complex blade tool trajectory in Ansys software package. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2025;(1):125–137. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2025-1-10

Введение

В настоящее время в автомобилестроении набирают обороты разработка и изготовление бесступенчатых трансмиссий. Основным механизмом в них является вариаторная передача, состоящая из конических шкивов и передаточного звена – ремня [1–4]. Конический шкив представляет собой сложную высокотехнологичную деталь, к качеству обработки которой предъявляются высочайшие требования. При обработке деталей такого типа важно подбирать такую подачу и частоту вращения, чтобы не возникло чрезмерных тепловых деформаций в процессе точения, которые влияют на геометрию будущей детали. Чтобы оценить влияние всех факторов на стружкообразование, необходимо создать параметрическую модель процесса в Ansys Workbench. Операция точения – один из самых распространенных и многофункциональных способов работы лезвийным инструментом. Токарной обработке посвящено большое количество отечественных и зарубежных работ в области моделирования и исследования технологических операций [5–10]. Объектом исследования в публикуемых работах является модель прямолинейной заготовки или модель кольца, а движение режущего инструмента рассматривается лишь по прямой линии неподвижной заготовки или с прямолинейной подачей для вращающегося кольца.

Ansys – это многоцелевой пакет программ численного моделирования физических процессов и явлений в различных областях. Данный пакет позволяет решать задачи моделирования технологических процессов лезвийных и абразивных инструментов. Ansys позволяет значительно экономить временные ресурсы, материальные затраты на проведение дорогостоящих натурных исследований, а также получать и изучать такие параметры процессов, которые недоступны для прямого измерения: зоны внутренних напряжений и деформаций, тепловые процессы в заготовке и инструменте. Программный комплекс Ansys Workbench позволяет управлять процессеми резания и абразивной обработки: гарантировать условия в процессе стружкообразования и обеспечивать характеристики износа инструмента, определять температурно-силовые параметры и характеристики, обеспечивать параметры качества деталей [5].

В программе Ansys Workbench существует ряд модулей для решение целого спектра задач. Самыми распространенными являются Static Structural – он позволяет рассматривать статическое воздействие нагрузки на объект, Modal – анализирует частоты колебаний при взаимодействии объектов, и Exsplicit Dynamics. Для создания модели токарной обработки использовался модуль Exsplicit Dynamics. Этот модуль позволяет детально рассмотреть контактное взаимодействие двух тел из различных материалов и оценить деформацию каждого из них в результате контакта. Структурная схема модели, раскрывающая связь расчетных модулей для моделирования стружкообразования в Ansys Workbench, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема модели Ansys Workbench

Основополагающим моментом при работе с программным комплексом Ansys Workbench является система координат. Ansys уделяет большое внимание этому аспекту, поскольку системы координат позволяют программе выполнять расчеты в стандартной глобальной декартовой системе координат, при этом предоставляя возможность задавать нагрузки, ограничения, направления материала, информацию о слоях, сечения балок, соединения, значения результатов и множество других важных аспектов модели в уникальных системах координат. В совокупности такой подход избавляет исследователей от необходимости выполнять преобразования систем координат. Во время расчета преобразование выполняется автоматически. Все системы координат обозначаются числом: 0–10 зарезервированы Ansys Mechanical для использования. Исследователи и инженеры могут использовать 11 и выше. По умолчанию в Ansys предусмотрено шесть систем координат: 0 – декартова, 1 – цилиндрическая по оси Z, 2 – сферическая, 4 – декартова, такая же, как 0, 5 – цилиндрическая по оси Y, 6 – цилиндрическая по оси X [11].

Материалы и методы

Компьютерная модель ортогональной обработки плоской поверхности, выполненная в программном комплексе Ansys, представлена на рис. 2. Модель состоит из трех основных элементов: обрабатываемой заготовки, режущего инструмента и удаляемого слоя. В качестве материала заготовки выступает металлический брусок размерами $20 \times 20 \times 100$ мм из стали 45. В качестве режущего инструмента выступает резец, передний угол которого равен 45°; задний угол – 60° ; материал режущей пластины – твердый сплав T15K6. Подача инструмента продольная, ее численное значение – 0,1 мм. Глубина резания при обработке (вертикальное начальное смещение режущей кромки относительно верхней плоскости заготовки) составляет 1 мм. Модель линейной обработки выступают твердотельные модели. Заготовка зафиксирована от перемещений горизонтальной плоскостью основания. Перемещение резца линейное вдоль оси ОХ, заданное параметром Displacement. В качестве силового воздействия выступает сила резания, направленная от резца к заготовке вдоль оси ОХ.



Рис. 2. Поля распределения напряжений по поверхности детали: a - в момент врезания резца; $\delta - в$ момент отделения стружки

По эпюрам, представленным на рис. 2, можно определить напряжения, возникающие в заготовке в процессе стружкоотделения. В данном исследовании

напряжение проявляется именно в зоне взаимодействия резца с деталью, что является нормой. Если напряжения будут недостаточные, это может привести к пластическим деформациям материала детали и, как следствие, нарушению ее свойств и геометрии, а также к быстрому снижению остроты режущей части резца.

Однако, как отмечено выше, подобные модели исследований характерны для прямолинейного движения режущего инструмента. Токарная обработка широко применяется для вращающихся деталей, т.е. деталь вращается вокруг своей оси и обрабатывается с помощью режущего инструмента, который, как правило, имеет прямолинейное движение.

Обработка конической поверхности шкивов представляет собой сложный процесс, сочетающий вращательное движение заготовки и перемещение режущего инструмента. Так как шкив имеет образующую, то помимо продольной подачи необходимо учитывать также и поперечную подачу. Сложность заключается в перемещении суппорта. В данном случае он перемещается не только вдоль оси вращения заготовки, но и также вдоль радиуса. Комбинируя между собой два направления подачи, возможно получить требуемую образующую конуса, которая будет являться тангенсом угла наклона к оси вращения шкива. Необходимо интерпретировать функции станка для обработки конической поверхности при помощи базовых функций программы Ansys Workbench.

Создание 3D-моделей производится при помощи любых CAD-систем и импортируется в формат IGS для загрузки в дерево расчета модели. В данном случае моделирование токарного резца для обработки шкива вариаторной трансмиссии производилось в программе Kompas 3D. Для оценки процесса стружкообразования были смоделированы резцы с различной геометрией режущей части. Моделирование обработки осуществлялось резцом, показанным на рис. 3. Параметры режущей части выбранного резца составляют: главный угол в плане – 45°, передний угол – 0°, угол наклона главного лезвия – 0°; радиус при вершине резца – 2 мм.



Рис. 3. Результат моделирования режущего инструмента

Перед настройкой расчетного модуля Exsplicit Dynamics необходимо создать цилиндрическую систему координат во вкладке Coordinate System в дереве расчетов. Это необходимо для того, чтобы при настройке модуля Exsplicit Dynamics задать в параметре Velosity угловой поворот заготовки относительно неподвижной системы координат, причем положение резца остается в полярной системе координат, создаваемой Ansys Workbench по умолчанию. Совмещение двух систем координат в расчетной модели осуществляется по оси OZ. Следовательно, ось вращения патрона токарного станка, моделируемая в расчетной модели, проходит через ось OZ двух совмещенных систем координат. При этом связь между декартовыми и цилиндрическими координатами в расчетной модели описывается системой уравнений

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi, \\ y = \rho \sin \varphi, \\ z = z, \end{cases}$$
(1)

где ϕ – угол, образованный проекцией радиус-вектора точки на обрабатываемой поверхности детали при вращении заготовки по часовой стрелке. При этом точка проецируется на ось OX с положительным направлением ($0 \le \phi \le 2\pi$); ρ – радиус заготовки в рассматриваемый момент обработки (минимальное расстояние от оси OZ до рассматриваемой точки на поверхности заготовки):

$$tg\varphi = \frac{y}{x},$$
 (2)

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}.$$
(3)

После создания цилиндрической системы координат в расчетную модель необходимо внести ряд условий и ограничений. Они добавляются посредством выбора в контекстном меню модуля Exsplicit Dynamics вкладки Insert. При токарной обработке необходимо в первую очередь задать вращение заготовки. Это осуществляется при помощи параметра Velosity. При выборе данной вкладки в контекстном меню появляется ряд параметров. В первой строке выбирается геометрия, а конкретно необходимо выделить тело заготовки, устанавливаемой в токарный патрон. В следующей строке выбирается созданная ранее цилиндрическая система координат. Требуется задать вращение вокруг необходимой оси. Так как ось вращения токарного шпинделя совпадает с осью ОZ, напротив данной строки указывается фактическая частота вращения, выраженная в рад/с. Значения осей ОХ и ОҮ необходимо указать равными нулю, так как шпиндель токарного станка не имеет осевого перемещения. Перемещения заготовки вдоль этих координат осуществляются лишь за счет упругости материала.

В контекстном меню модуля Exsplicit Dynamics выбирается следующий немаловажный параметр Fixed. Без данного параметра невозможно выполнить расчет, так как при обработке заготовка будет перемещаться вдоль оси вращения шпинделя, не воспринимая силового воздействия от резца, поэтому во вкладке Geometry данного параметра выбирается технологическая база заготовки. Здесь для расчетной модели этой поверхностью выступает внутренняя грань шкива. Токарный патрон центрует заготовку при помощи трех обратных кулачков враспор. Упор заготовки во избежание осевого перемещения осуществляется при помощи торцевого бурта, формируемого при расточке кулачков. После настройки данного параметра в расчетной модели появится еще одно дополнительное ограничение, не позволяющее случайного перемещения заготовки шкива вдоль оси ее вращения. Параметр Displacement в расчетной модели задает перемещение резца вдоль образующей шкива. Этот параметр предлагается использовать для моделирования обработки сложных конических поверхностей с любым углом наклона образующей. При этом модель токарной обработки идентична технологическому процессу, так как учитываются продольная S_x и поперечная S_y подачи инструмента. Для настройки данного параметра указывается перемещение резца относительно осей ОХ и ОҮ, тем самым имитируется продольная и поперечная подачи. Смещение траектории перемещения резца относительно образующей шкива определяет глубину резания. Затем при помощи выбора плоскости обработки задается сила воздействия резца на заготовку. Эта сила должна быть направлена перпендикулярно касательной к конусной поверхности. Моделирование перемещения резца относительно заготовки показано на рис. 4.



Рис. 4. Моделирование перемещения резца относительно заготовки

После внесенных ограничений указывается численное значение силового воздействия. В контекстном меню расчетного модуля это параметр Force. В данной модели оно проявляется путем воздействия силы резания, передаваемой от резца к заготовке шкива в процессе его вращения. Так как в данной модели выполняется обработка детали сложной геометрической формы, направление воздействия силы резания на заготовку шкива осуществляется перпендикулярно касательной, проведенной через рассматриваемую точку, в которой в данный момент расположен резец, во вкладке Geometry выбирается ось подачи. В данном случае выбирается образующая конической поверхности, она сочетает в себе продольную и поперечную подачи. После этого выбирается точка приложения силы. Она зависит от того, как выполняется обработка. Чаще всего обработка осуществляется от периферии к центру. Необходимо расположить элементы модели в расчетной области. Если обработка шкива начинается с периферии, то резец располагается на расстоянии 10 мм от наружного диаметра шкива, поэтому выбирается крайняя точка образующей, расположенная ближе к периферии заготовки. В строке Force указывается фактическая сила резания. Перед моделированием процесса обработки в Ansys составлена схема для определения указания режимов резания и параметров обработки (рис. 5).



Рис. 5. Схема процесса обработки

Сила резания рассчитывается исходя из величины скорости резания. При этом при помощи поправочных коэффициентов корректируется ее значение, изменяемое за счет различных углов резца. Влияние на геометрию и качество поверхности при обработке шкива определяет радиальная составляющая силы резания P_z . Ее величина имеет немаловажное значение, так как при этом изменяется угол атаки резца на шкив и от этого зависят параметры стружкоотделения. Скорость резания зависит от подачи инструмента.

Для определения направления радиальной составляющей силы резания и дальнейшего указания вектора ее действия в Ansys составлена модель распределения сил в процессе обработки (рис. 6).



Рис. 6. Модель распределения сил в процессе обработки

Значение силы резания, необходимое для расчетной модели в Ansys Workbench, определяется по формуле

$$P_z = 9,81C_p t^x S^y v^n K_p, \tag{4}$$

где v – фактическая скорость резания; S – подача инструмента; t – глубина резания; C_n, x, y, n – коэффициенты резания, учитывающие геометрию и материал резца [12].

Формула (4) учитывает геометрию и материал резца. Для используемого резца из быстрорежущей стали сила резания $P_z = 1114$ Н. Полученное значение загружается в дерево исследований при помощи поля ввода значений в параметре Force. В качестве объекта приложения силы выбирается коническая поверхность.

Физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, указываемые во вкладке Engineering Data, представлены в табл. 1.

Таблица 1

МΠа

85

1100

	И	инструмен		риалов	
Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °С)	Допускаемые напряжения при срезе, МП

 $2 \cdot 10^{11}$

 $126 \cdot 10^{11}$

Сталь 45

Сплав Т15К6

7850

11700

0,29

0.23

Физико-механические свойства обрабатываемого U ULICTINUMALITATI LIOFO MATANUATOR

Для моделирования отделения стружки от обрабатываемой поверхности в качестве критерия разрушения материала использована сопряженная модель Джонсона – Кука, учитывающая влияние трехосности напряжений, скорости деформации и температуры на деформацию до разрушения. Модель разрушения Джонсона – Кука широко применяется из-за простоты формулировки, калибровки и ряда параметров материала, предложенных Джонсоном и Холмквистом [7, 13]. Модель разрешения Джонсона – Кука описывает накопление повреждения каждого элемента на основе кумулятивного закона накопления поврежденности

$$D = \sum \frac{\Delta \overline{\varepsilon}}{\varepsilon_f},\tag{5}$$

486

225

где $\Delta \overline{\epsilon}$ – инкремент эффективной пластической деформации во время цикла интегрирования; ε_{f} – эквивалентная деформация разрушения [7, 13].

Согласно модели Джонсона – Кука разрушение происходит, если параметр повреждения D превышает значение единицы $D \ge 1$. В законе накопления разрушений (5) $\Delta \overline{\epsilon}$ представляет собой эквивалентное приращение деформации. Накопленная деформация обновляется при каждом шаге анализа. Эквивалентная деформация разрушения ε_f определяется как

$$\varepsilon_{f} = \left(D_{1} + D_{2} \exp\left(D_{3} \frac{P}{q}\right)\right) \left(1 + D_{4} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0}}\right) \left(1 + D_{5} \frac{T - T_{0}}{T_{m} - T_{0}}\right),\tag{6}$$

где D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 – параметры разрушения материала; P – давление в рассматриваемом конечном элементе; q – напряжение Мизеса; $\dot{\varepsilon}$ – скорость пластической деформации; $\dot{\varepsilon}_0$ – скорость деформации при статических испытаниях; T_0 и T_m – температура окружающей среды и температура плавления материала соответственно; T – текущая температура [7, 13].

Приложение Ansys Workbench содержит модель Джонсона – Кука и позволяет моделировать сложное поведение материала при динамическом нагружении. Параметры материала D_1 , D_2 , D_3 характеризуют отношение гидростатического давления (или среднего напряжения к эквивалентному напряжению Мизеса); параметр D_4 учитывает влияние скорости деформации на разрушение; параметр D_5 определяет влияние температуры на деформацию при разрушении (табл. 2).

Таблица 2

Параметры модели Джонсона – Кука для стали 45, характеризующие условия разрушения

I	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
	0,04	1,03	1,39	0,002	0,46

Результаты и обсуждение

После запуска расчетного модуля получена модель лезвийной обработки со стружкообразованием. Для визуализации напряжений, возникающих в процессе, на тело заготовки нанесена графическая эпюра. На рис. 7,*а* представлена модель процесса токарной обработки детали с глубиной резания t = 0.8 мм. На рис. 7,*б* представлена модель процесса токарной обработки детали с глубиной резания t = 1.5 мм.



Рис. 7. Модель процесса токарной обработки детали: a - c глубиной резания t = 0,8 мм; $\delta - c$ глубиной резания t = 1,5 мм

По результатам графического анализа эпюр моделей токарной обработки можно сделать вывод, что при обработке с глубиной резания t = 1,5 мм наблюдается неравномерное отхождение стружки с поверхности заготовки и повышенное напряжение вне области резания. Такое поле напряжений может привести к перегреву заготовки и короблению (см. рис. 7,б). При обработке с глубиной резания 0,8 мм наблюдается равномерное стружкообразование. Следовательно, для повышения качества обработки требуется применять глубину резания не более 0,8 мм и увеличить число проходов инструмента. Максимальное напряжение при срезе для стали 45 соответствует $\tau = 85$ МПа. Фактическое значение напряжений среза при моделировании процесса токарной обработки шкива с глубиной резания t = 0.8 мм согласно эпюрам Ansys Workbench составило $\tau = 96$ МПа, что выше в 1,13 раза по сравнению с максимальным напряжением при срезе для данного материала. При моделировании процесса токарной обработки детали с глубиной резания t = 1,5 мм значение напряжений составляет $\tau = 190$ МПа, что выше в 2,12 раза по сравнению с максимальным напряжением при срезе для данного материала. Напряжения, возникающие при обработке, превосходят $\tau = 85$ МПа, следовательно, процесс обработки будет проходить эффективно, без образования наклепа металла заготовки, стружкообразование равномерное.

Заключение

Значение эквивалентной деформации позволяет судить о степени сдвиговой деформации шкивов при пластической деформации металла заготовки в результате силового воздействия, передаваемого от резца. Полученные в модели значения напряжений и температуры в зоне резания использованы для расчета эквивалентной деформации.

Полученная компьютерная модель взаимодействия резца с заготовкой при сложном пространственном перемещении режущего инструмента дает визуальное представление о характере деформации и удалении поверхностного слоя материала. Напряжения, полученные в данной модели при срезе металла с заготовки при глубине резания t = 0,8 мм и t = 1,5 мм, выше в 1,13 и 2,12 раза соответственно, чем максимальные напряжения среза для стали 45. Полученные значения соответствуют реальным условиям обработки деталей и говорят об эффективности металлообработки и стружкообразовании.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что предлагаемая компьютерная модель лезвийной обработки со сложным перемещением режущего инструмента адекватна. Визуализация процесса резания и полей напряжений показала хорошее качественное и количественное совпадение результатов моделирования и расчетов.

Список литературы

- Generalova A., Zverovshchikov A., Nikulin A. Surface undulation parameters of continuously variable transmission friction during turning // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2022. doi: 10.1016/j.jksues.2022.06.001
- Генералова А. А., Зверовщиков А. Е., Никулин А. А. Исследование влияния микропрофиля фрикционных элементов вариатора на коэффициент трения в зоне контакта и коэффициент полезного действия передачи // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 3. С. 154–172. doi: 10.21685/2072-3059-2023-3-12

- 3. Yamazaki M., Kato Y., Nakahara T., Ichihashi T. Research on Improvement of Transmission Efficiency by Improving Friction Coefficient Between Elements and Pulleys of a Belt CVT // Review of automotive engineering. 2008. Vol. 29. P. 485–492.
- Yagyaev E., Shron L., Meniuk D. Increasing the operational reliability of car variators due to creating regular surface microrelief by laser ablation // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 889. P. 012007.
- Mamalis A., Horváth M., Branis A. S., Manolakos D. Finite element simulation of chip formation in orthogonal metal cutting // Journal of Materials Processing Technology. 2001. Vol. 110. P. 19–27. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00861-X
- Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel // Journal of Engineering Manufacture. 2005. Vol. 219. P. 515–524. doi: 10.1243/095440505X32445
- Кхалифа М., Дуюн Т. А. Моделирование процесса резания конструкционной стали с использованием конечноэлементного пакета ANSYSWorkbench // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2019. № 11. С. 121–127. doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127
- Maekawa K., Kubo A., Kitagawa T. Simulation analysis of cutting mechanism in plasma hot machining of high manganese steels // Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering. 1988. Vol. 22. P. 183–189.
- 9. Öpöz T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation // Journal of Mechanical Engineering. 2016. № 1. P. 11.
- 10. Murugesan M., Jung D. W. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming application // Journal of materials. 2019. № 1. P. 18.
- Молоков К. А., Дабалез М. Применение Mechanical APDL при расчетах сварных конструкций в курсовом проектировании : учеб.-метод. пособие / Политехнический институт ДВФУ. Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023. 76 с.
- 12. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. М. : Машиностроение, 1975. 244 с.
- Johnson G., Holmquist T. Test data and computational strength and fracture model constants for 23 materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures / Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM. 1989. Report No. LA-11463-MS.

References

- Generalova A., Zverovshchikov A., Nikulin A. Surface undulation parameters of continuously variable transmission friction during turning. *Journal of King Saud University* – *Engineering Sciences*. 2022. doi: 10.1016/j.jksues.2022.06.001
- Generalova A.A., Zverovshchikov A.E., Nikulin A.A. Investigation of the effect of the microprofile of the friction elements of a variator on the coefficient of friction in the contact zone and the transmission efficiency. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy*. *Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences.* 2023;(3):154–172. (In Russ.). doi: 10.21685/2072-3059-2023-3-12
- Yamazaki M., Kato Y., Nakahara T., Ichihashi T. Research on Improvement of Transmission Efficiency by Improving Friction Coefficient Between Elements and Pulleys of a Belt CVT. *Review of automotive engineering*. 2008;29:485–492.
- 4. Yagyaev E., Shron L., Meniuk D. Increasing the operational reliability of car variators due to creating regular surface microrelief by laser ablation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;889:012007.
- Mamalis A., Horváth M., Branis A.S., Manolakos D. Finite element simulation of chip formation in orthogonal metal cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;110:19–27. doi: 10.1016/S0924-0136(00)00861-X
- 6. Belhadi S., Mabrouki T., Rigal J.-F., Boulanouar L. Experimental and numerical study of chip formation during straight turning of hardened AISI 4340 steel. *Journal of Engineering Manufacture*. 2005;219:515–524. doi: 10.1243/095440505X32445

- Kkhalifa M., Duyun T.A. Modeling of the cutting process of structural steel using the ANSYSWorkbench finite element package. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova = Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2019;(11):121–127. (In Russ.). doi: 10.34031/2071-7318-2019-4-11-121-127
- Maekawa K., Kubo A., Kitagawa T. Simulation analysis of cutting mechanism in plasma hot machining of high manganese steels. *Bulletin of the Japan Society* of Precision Engineering. 1988;22:183–189.
- 9. Öpöz T., Chen X. Chip formation mechanism using finite element simulation. *Journal* of Mechanical Engineering. 2016;(1):11.
- 10. Murugesan M., Jung D.W. Johnson Cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming application. *Journal of materials*. 2019;(1):18.
- 11. Molokov K.A., Dabalez M. Primenenie Mechanical APDL pri raschetakh svarnykh konstruktsiy v kursovom proektirovanii: ucheb.-metod. posobie = Application of Mechanical APDL in calculations of welded structures in course design : educational and methodical manual. Vladivostok: Izd-vo Dal'nevost. federal. un-ta, 2023:76. (In Russ.)
- 12. Bobrov V.F. Osnovy teorii rezaniya metallov = Fundamentals of the theory of metal cutting. Moscow: Mashinostroenie, 1975:244. (In Russ.)
- Johnson G., Holmquist T. Test data and computational strength and fracture model constants for 23 materials subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures / Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM. 1989. Report No. LA-11463-MS.

Информация об авторах / Information about the authors

Александра Александровна Генералова кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: generalova_aa@mail.ru

Артем Анатольевич Никулин

инженер-исследователь, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: artem.nikulin2003@yandex.ru

Дмитрий Сергеевич Бычков

инженер-исследователь, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40) E-mail: deciptikon@mail.ru Aleksandra A. Generalova Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of mathematical support and computer application, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Artem A. Nikulin

Research engineer, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Dmitriy S. Bychkov

Research engineer, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.01.2025 Поступила после рецензирования/Revised 26.02.2025 Принята к публикации/Accepted 15.03.2025