

Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621.9.048.6
doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-4-15

К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ТРЕЩИНЫ ПРИ ВИБРОТОЧЕНИИ

Егор Алексеевич Кудинов¹, Александр Андреевич Владимиров^{2✉}, Алексей Владимирович Макаров³, Антон Иванович Шаповалов⁴

^{1, 2, 3, 4} Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», Россия, 309516, г. Старый Оскол, Белгородская обл.

¹ kudinov19991704@mail.ru

² vladimirov.al.an@yandex.ru ; 0000-0001-7992-1694

³ makarov.av@mail.ru ; 0000-0003-2221-8951

⁴ shapowalow130477@yandex.ru

Аннотация

Цель исследования заключается в определении возможности создания условий для возникновения опережающей трещины путем регулирования режимов вибрационного точения, независимо от свойств обрабатываемых материалов.

Задача, решению которой посвящена статья. Статья посвящена моделированию процесса вибрационного точения для формирования напряжений в обрабатываемом материале для создания условий возникновения и поддержания опережающей трещины в зоне резания при вибрационном точении, поиску оптимальных режимов для создания условий к ее существованию.

Методы исследования. Моделирование осуществлялось методом конечных элементов в программном комплексе Deform. Начальной точкой для моделирования были приняты результаты натурных экспериментов по вибрационному точению коррозионностойкой стали аустенитного класса 12X18H10T.

Новизна работы заключается в применении метода конечных элементов для определения режимов вибрационного точения с целью создания в обра-

батываемом материале определенной зоны внутренних напряжений в заданном направлении для формирования опережающей трещины.

Результаты исследования. В результате моделирования были определены оптимальные режимы точения при вибрационном резании, которые позволят создавать условия для возникновения опережающей трещины и исчерпания запаса пластичности обрабатываемого материала.

Выводы: Создание опережающей трещины и исчерпание запаса пластичности обрабатываемого материала способствует созданию процесса дробления стружки, формированию микрогеометрии обрабатываемой поверхности при виброточении, снижению сил резания при точении труднообрабатываемых материалов и наплавленных поверхностей.

Ключевые слова: виброточение, амплитуда, колебания, частота, колебания, метод, конечные элементы, трещина, взаимодействие, запас, пластичность.

Ссылка для цитирования:

Кудинов Е.А. К вопросу о моделировании опережающей трещины при виброточении / Е. А. Кудинов, А. А. Владимиров, А. В. Макаров, А. И. Шаповалов // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 3. – С. 4 – 15 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-4-15.

Original article
Open Access Article

THE PROBLEM OF MODELING A LEADING CRACK DURING VIBRATORY TURNING

Egor Alekseevich Kudinov¹, Aleksander Andreevich Vladimirov^{2✉},
Aleksey Vladimirovich Makarov³, Anton Ivanovich Shapovalov⁴

^{1, 2, 3, 4} National University of Science and Technology MISIS, Stariy Oskol, Belgorod Region, Russia, 309516

¹ kudinov19991704@mail.ru

² vladimirov.al.an@yandex.ru ; 0000-0001-7992-1694

³ makarov.av@mail.ru ; 0000-0003-2221-8951

⁴ shapowalow130477@yandex.ru

Abstract

The work objective is to consider the possibility of creating conditions for appearing a leading crack by adjusting the modes of vibratory turning, regardless of the properties of the machined materials.

The problem to which the paper is devoted. The paper is devoted to modeling vibration turning for developing stresses in the machined material to create conditions for appearing and maintaining a leading crack and in the cutting area during vibratory turning, the search for optimal modes to create conditions for its existence.

Research methods. Modeling was carried out by the finite element method in Deform software application. The starting point for modeling was the results of field experiments on vibratory turning of corrosion-resistant austenitic steel 12X18H10T.

The novelty of the work lies in the application of the finite element method to define the modes of vibratory turning in order to create a certain area of internal stresses in the processed material in a given direction for forming a leading crack.

Study results. As a result of modeling, optimal turning modes are defined during vibration cutting, which will create conditions for appearing a leading crack and exhausting the plasticity margin of the machined material.

Conclusions: The creation of a leading crack and the exhaustion of the plasticity margin of the machined material contributes to the chip control, the formation of microgeometry of the machined surface during vibratory turning, the reduction of cutting forces when turning hard-to-machine materials and built-up surfaces.

Keywords: vibratory turning, amplitude, oscillations, frequency, oscillations, method, finite elements, crack, interaction, margin, plasticity.

Reference for citing:

Kudinov E.A. The problem of modeling a leading crack during vibratory turning / E. A. Kudinov, A. A. Vladimirov, A.V. Makarov, A. I. Shapovalov // Transport Engineering. - 2022. - no. 3. - p. 4 – 15 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-4-15.

Введение

Механическая обработка заготовок из различных труднообрабатываемых материалов и из конструкционных сталей с восстановленными рабочими поверхностями, методом электродуговой наплавки, при резании на станках токарной группы, происходит с зарождением ряда физических процессов в зоне контакта инструмента с заготовкой. Процессы, происходящие в зоне контакта инструмента и заготовки, значительно влияют на условия протекания процесса механической обработки, в частности, на такие параметры, как величина микронеровностей поверхности и шероховатость поверхности после механической обработки, период стойкости режущего инструмента. Основными такими являются процесс образования стружки и наростообразование. Необходимо выделить, что процесс образования стружки во время протекания процессов механической обработки резанием отличается в зависимости от физико-механических свойств, обрабатываемого материала. Для нахождения наиболее эффективных условий протекания процесса обработки определённого материала необходимо изменить ряд параметров, таких как режимы резания и геометрия режущего инструмента. При нахождении необходимых значений этих параметров возмож-

но кардинально изменить протекание процесса резания для выбранного материала.

В работе [1] было установлено явление, которое связано с возникновением опережающей трещины в срезаемой части материала, которая была направлена от вершины резца в заготовку. Было отмечено, что возникновение опережающей трещины наблюдалось в сталях средней твердости при значительной толщине стружки. Возникновение опережающих трещин также было отмечено в сталях, которые были подвержены термической обработке в виде нормализации или улучшения. Структура таких сталей способствовала разрушаться ее, при механической обработке резанием, легче по самим зернам, чем по прослойкам. При этом было отмечено, что в мягких по твердости и вязких по механическим свойствам металлах, возникновение опережающей трещины не наблюдалось. Механическая обработка таких материалов, резанием с высокими скоростями, образованию опережающей трещины не способствовала [8].

Существовало и противоположное мнение о данном явлении, так коллективом авторов в работе [2] опровергалось существование такого явления, как опережающая трещина.

Таким образом, следует вывод, что при выявлении, в результате эксперимен-

тальных исследований явления опережающей трещины, наблюдались значительные различия в методологии эксперимента. Также, на данное явление оказывает влияние большое количество факторов, которые, по всей видимости не учитывались в экспериментах вовсе или учитывались, но не в полном объеме.

В 1912-1914 гг. одним из ученых был использован металлографический метод для нахождения и определения линий скольжения в удаляемом с поверхности заготовки слоя материала. Эти линии и есть следы плоскостей скольжения, и по которым происходило скольжение частиц металла внутри элементов (рис. 1).

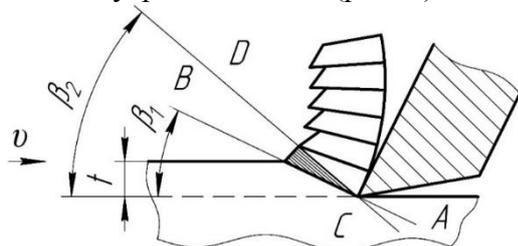


Рис. 1. Схема образования стружки:
 t – глубина резания, v – скорость резания, β_1 – угол сдвига, β_2 – угол плоскости скольжения, AB – плоскость сдвига, CD – плоскость скольжения
 Fig. 1. Chip formation scheme:
 t – is the depth of cut, v is the cutting speed, β_1 – is the shear angle, β_2 – is the angle of the sliding plane, AB – plane of shear, CD – slip plane

Исследования, проводимые после, под руководством профессора А. М. Розенберга [2], также подтвердили наличие линий скольжения, обнаруженные ранее Я. Г. Усачевым. По результатам исследований, было отмечено увеличение углов β_1 и β_2 при увеличении глубины, скорости резания и переднего угла режущего инструмента, также оказывало значительное влияние на протекание процесса стружкообразования.

В работе [3] авторами было отмечено протекание процесса возникновения опережающей трещины в зоне резания. Характерной особенностью обнаруженной опережающей трещины являлся ее переход в плоскость сдвига при распространении вверх.

Результаты дальнейших исследований, о протекании процесса возникновения

опережающей трещины представлены в статье [2, 3]. Авторами было установлено, что разрушение обрабатываемого материала, вследствие создания зоны повышенных значений напряжений расположенной рядом с режущей кромкой инструмента и в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала, при резании может происходить по двум схемам: формированию пластической зоны по направлению 1 и опережающей трещины по направлению 2 (рис. 2).

В результате проведения экспериментальных исследований, авторами было установлено, что возникновение зон концентраций напряжений, в зоне контакта режущего инструмента и поверхности заготовки, происходит вне зависимости от свойств обрабатываемого материала [3]. Результаты, полученные с помощью конечно-элементного моделирования, воспроизведенного по результатам практических экспериментов, показали, что продолжение роста величины сжимающих усилий не оказывает влияния на качественные изменения зоны деформаций. Следует отметить, что также происходит увеличение зоны и степени пластических деформаций, при этом процесс стружкообразования от процесса сжатия не происходит. Предположительно для зоны 1 преобладает такой вид деформаций как изгиб, способствующий отделению припуска обрабатываемого металла в месте ослабления концентраций напряжений. Для зоны 2 стружка при изгибе начинает разрушаться у основания «консоли», в этом случае происходит сдвиг стружки по поверхности сдвига.

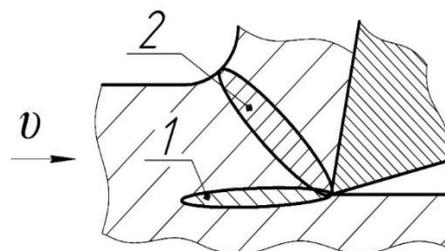


Рис. 2. Зоны возможных разрушений:
 1 – зона разрушения упругопластичных материалов, 2 – зона разрушения хрупких материалов

Fig. 2. Zones of possible destruction:
 1 – zone of destruction of elastoplastic materials, 2 – zone of destruction of brittle materials

Была выявлена прямая зависимость между размером зоны пластических деформаций и значением изгибающего момента отделяемой стружки. При этом образующийся рычаг снижал значение силы, необходимое для разрушения обрабатываемого материала. Если в зоне резания преобладает работа изгиба, то стружкообразование происходит при разрушении припуска вдоль поверхности резания в зоне 1, последующий сдвиг вдоль области разрушения и циклическое повторение этих действий воздействует на образование элементной стружки. Для хрупких материалов после образования опережающей

трещины рядом с местом врезания вершины лезвия инструмента, незначительный изгиб возникающей консоли завершается изломом и образуется стружка надлома. Авторы в своей работе не исключают, что при хрупком разрушении наблюдаются предварительные пластические деформации, что сходится с теорией разрушения Степанова, и наоборот, при разрушении пластичных материалов зарождаются явления, происходящие при точении хрупких материалов, связанные с упрочнением, деформированием кристаллических решёток и концентрацией дислокаций [3, 4].

Материалы, модели, эксперименты и методы

Для точения заготовок из труднообрабатываемых материалов используют различные точения с введением в зону резания дополнительной энергии. Одним из таких методов является точение с наложением маятниковых колебаний на вершину режущего инструмента. Оптимально выбранные вибрационные характеристики способствуют получению максимальной производительности процесса вкуче с повышением периода стойкости режущего

инструмента и созданием процесса стружкодробления. При вибрационном точении на процесс резания влияют ряд факторов, отличных от обычного точения. Достижение наибольшей эффективности применения вибрационного точения для обработки различных материалов является важной задачей. Эту задачу позволяет решить моделирование этого процесса в программном комплексе *DEFORM*, используя метод конечных элементов [5-7].

Таблица
Режимы вибрационного резания для конечно-элементного моделирования

Table

Vibratory cutting modes for finite element modeling

Скорость резания V , м/мин	Частота колебаний f , Гц	Амплитуда колебаний A , мкм	Глубина резания t , мм	Подача на оборот S_0 , мм/об
100	25	50	0,5	0,15
100	50	100		
100	75	150		
200	25	50		
200	50	100		
200	75	150		

Были смоделированы процессы точения и вибрационного точения на различных режимах резания колебания для различных марок труднообрабатываемых сталей, например, 08X17H13M2, 65Г, ШХ15.

Сравнение процессов осуществлялось по следующим параметрам: температура в зоне резания, температура в теле стружки, напряжения и деформации в зоне резания, тангенциальная сила резания, нормальная сила резания, наличие или от-

сутствие зоны образования опережающей трещины.

Более яркие различия в смоделированных процессах наблюдались при обработке стали марки 12X18H10T. Аналогом данного материала в среде моделирования являлся *AISI-321* (стандарт США). При моделировании процессов температура заготовки принималась 20 °С, с заявленной твёрдостью по шкале Бринелля равной 170 НВ, фазовое состояние заготовки – пла-

стичное. В качестве материала режущей кромки инструмента был выбран твёрдый сплав марки WC (карбид вольфрама) [9].

Наиболее эффективным показал себя процесс со следующими параметрами: Скорость резания $V = 200$ м/мин, частота колебаний $f = 75$ Гц, амплитуда колебаний

Результаты

Первым параметром для сравнения процессов резания была температура. На рис. 3 отчётливо видно зону распределения

$A = 150$ мкм, глубина резания $t = 0,5$ мм, подача на оборот $S_0 = 0,15$ мм/об. Далее приведём результаты сравнения этого процесса с обычным точением для выявления различий, возникающих в зоне резания при обработке.

максимальных температур при обычном точении, максимальные значения которой находились в диапазоне 360-410 °С.

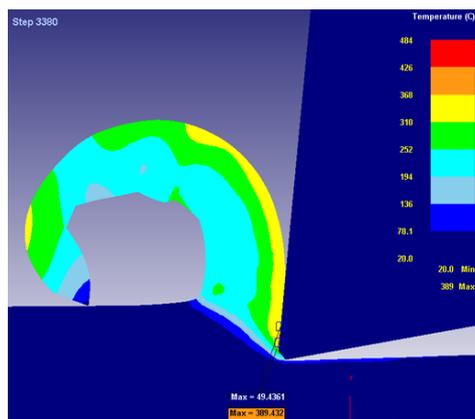


Рис. 3. Температура в зоне резания при обычном точении

Fig. 3. Temperature in the cutting zone during normal turning

Следующими параметрами для анализа были тангенциальная и нормальная составляющие силы резания. При смоделированном процессе точения были получены следующие значения тангенциальной силы P_z , представленные на рис. 6. График отображает скачок силы резания, что связано с наклёпом или налипанием срезанной стружки на кромке режущего инструмента, вследствие чего происходит перепад напряжений и усилий на передней кромке резца. Это также отображает обширная зона напряжений в зоне резания переходящая в тело стружки. Кроме того, значения этой составляющей постепенно повышались в ходе процесса резания, что отрицательно сказывалось на износе режущего инструмента.

На рис. 7 и 8 отображены графики тангенциальной составляющей силы резания при виброточении. Во время обработки с наложением вибраций на режущий инструмент происходят периодические маятниковые колебания, которые вызывают

такую форму графика.

Периодические спады напряжений в зоне резания и на режущей кромке инструмента также положительно влияют на протекание процесса резания, снижая его износ.

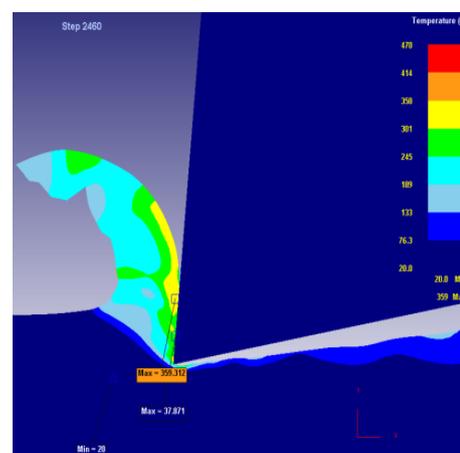


Рис. 4. Температура в зоне резания при вибрационном точении (в нижнем положении инструмента)

Fig. 4. Temperature in the cutting zone during vibration turning (in the lower position of the tool)

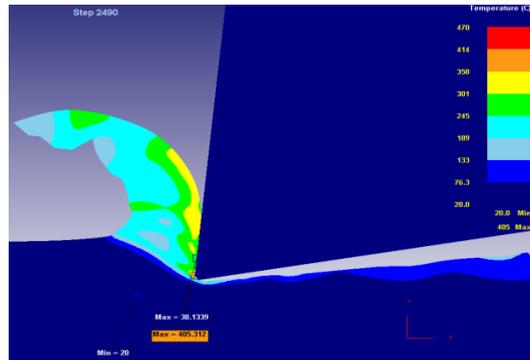


Рис. 5. Температура в зоне резания при вибрационном точении (в верхнем положении инструмента)
Fig. 5. Temperature in the cutting zone during vibration turning (in the upper position of the tool)

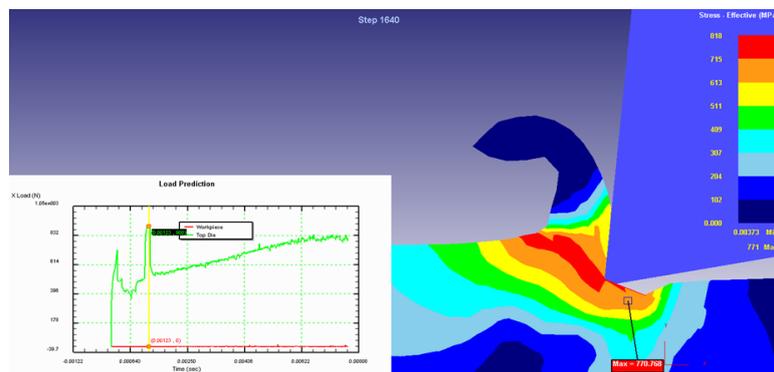


Рис. 6. График значений тангенциальной составляющей силы резания и распределение напряжений в зоне резания при обычном точении
Fig. 6. Graph of the values of the tangential component of the cutting force and the distribution of stresses in the cutting zone during conventional turning

При обычном точении (рис. 9) прослеживалась такая же тенденция повышения напряжений, как и у тангенциальной составляющей. В целом нормальная составляющая находилась в более стабильном диапазоне в процессе резания, но

наблюдалась тенденция, схожая с тангенциальной составляющей силы резания.

Далее анализировались нормальные составляющие силы резания, они также представлены в виде графиков значений.

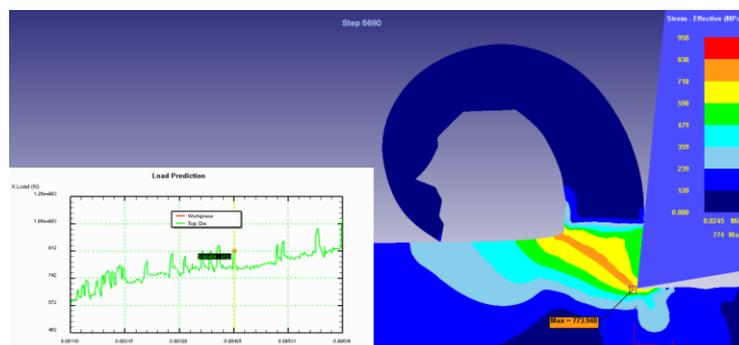


Рис. 7. График значений тангенциальной составляющей силы резания и распределение напряжений в зоне резания при вибрационном точении (в верхнем положении инструмента)
Fig. 7. The graph of the values of the tangential component of the cutting force and the distribution of stresses in the cutting zone during vibration turning (in the upper position of the tool)

После моделирования вибрационного процесса, можно отметить, что нормальная составляющая силы резания изменяется по тому же периодическому закону, что и тангенциальная. Это подтверждается графиком и распределением значений этой составляющей на протяжении всего процесса точения, представленным на рисунке 10. Стоит отметить, что изменение значе-

ний этой составляющей несущественно и можно сделать вывод, что она оказывает меньшее влияние на протекание процесса точения, нежели тангенциальная составляющая.

Важным параметром для сравнения является напряжение в зоне резания и области его распределения.

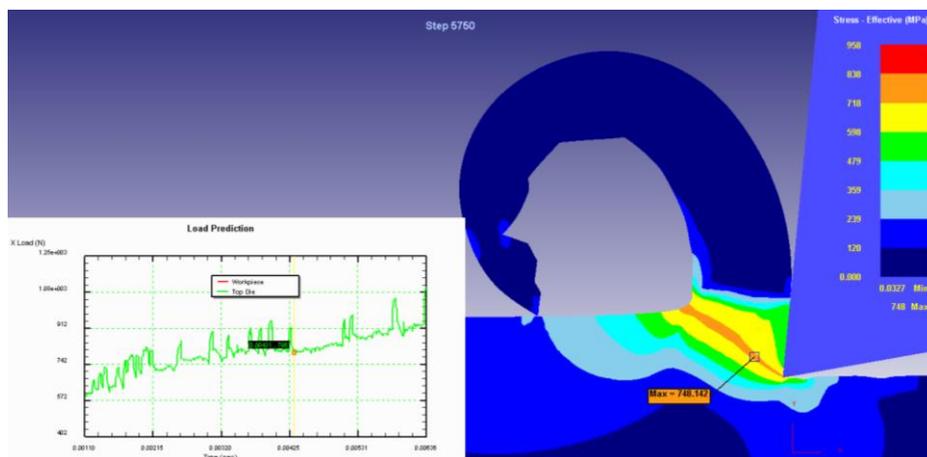


Рис. 8. График значений тангенциальной составляющей силы резания и распределение напряжений в зоне резания при вибрационном точении (в нижнем положении инструмента)
 Fig. 8. The graph of the values of the tangential component of the cutting force and the distribution of stresses in the cutting zone during vibration turning (in the lower position of the tool)

При моделировании процесса точения наблюдались стабильные значения этого показателя с достаточно большой зоной распределения, показанные на рис. 11. Таким образом, наличие такой зоны распределения напряжений ухудшает протекание процесса резания. Пиковые значе-

ния напряжений достигали порядка 770...775 МПа, а средний диапазон был 740...750 МПа. В течении процесса наблюдались резкие возрастания напряжений, связанные с наклёпом или налипанием стружки на передней поверхности резца.

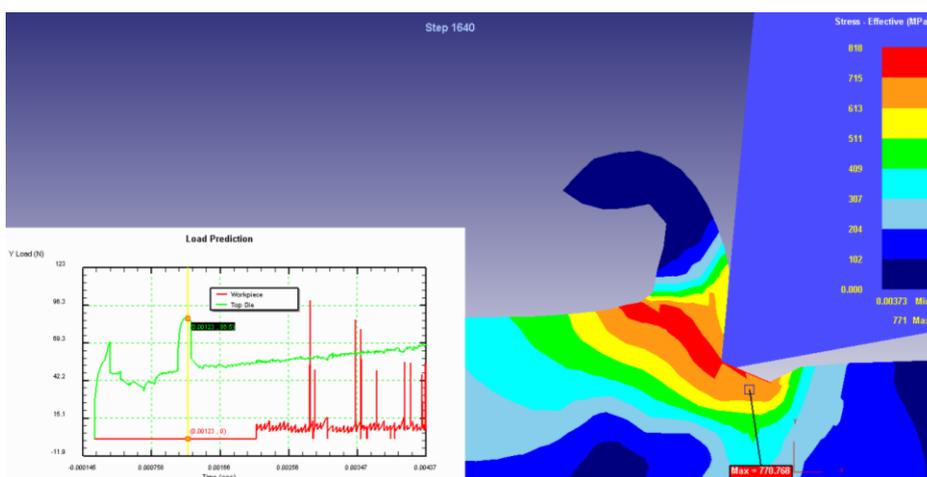


Рис. 9. График значений нормальной составляющей силы резания и распределение напряжений в зоне резания при обычном точении
 Fig. 9. Graph of the values of the normal component of the cutting force and the distribution of stresses in the cutting zone during conventional turning

Во время моделирования процесса вибрационного точения диапазон средних значений был 740...770 МПа, но максимальные значения не выходили за пределы этого диапазона. Кроме того, наблюдались периодические перераспределения зон и снижения величин напряжений, связанные с приложенными к резцу периодическими колебаниями, это можно увидеть на рис. 11 и 12. При уходе резца из зоны резания

происходило снижение напряжений на его передней поверхности, в пользу деформаций снимаемого слоя в виде стружки, что не только способствовало снижению износа инструмента, но и несколько улучшало предварительное деформирование материала перед воздействием на него режущей кромкой для последующего срезания в виде стружки при рабочем ходе резца.

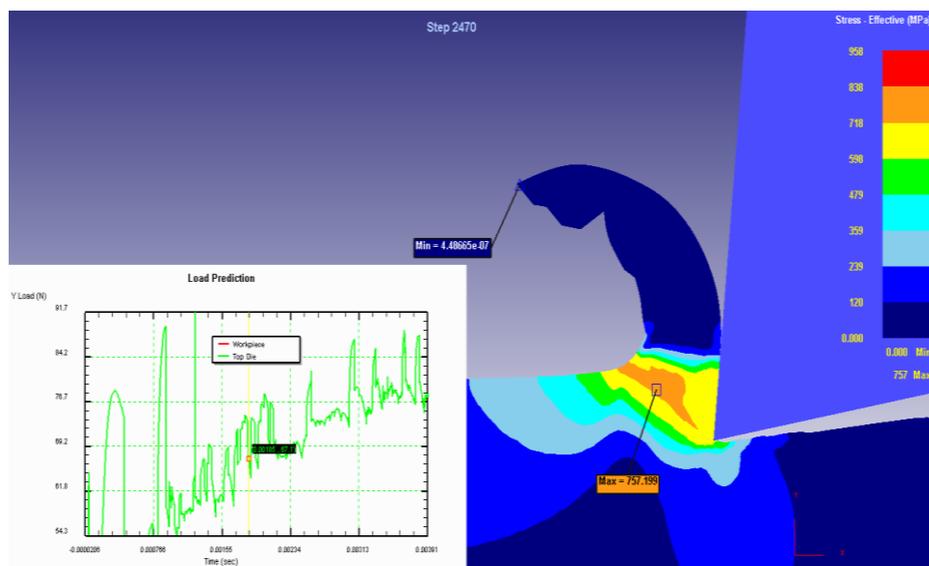


Рис. 10. График значений нормальной составляющей силы резания и распределение напряжений в зоне резания при вибрационном точении (в нижнем положении инструмента)

Fig. 10. The graph of the values of the normal component of the cutting force and the distribution of stresses in the cutting zone during vibration turning (in the lower position of the tool)

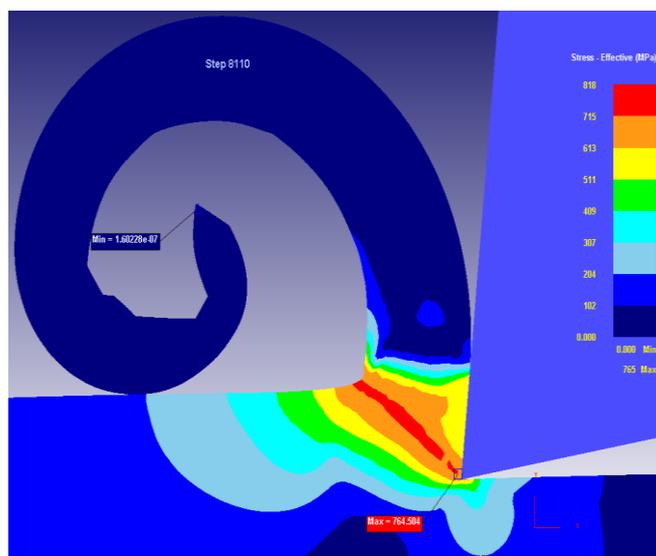


Рис. 11. Зона распределения напряжений в зоне резания при обычном точении

Fig. 11. The zone of stress distribution in the cutting zone during conventional turning

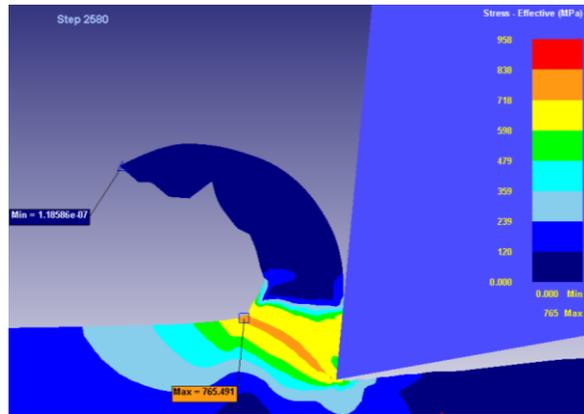


Рис. 12. Зона распределения напряжений в зоне резания при вибрационном точении (в верхнем положении инструмента)
 Fig. 12. Zone of stress distribution in the cutting zone during vibration turning (in the upper position of the tool)

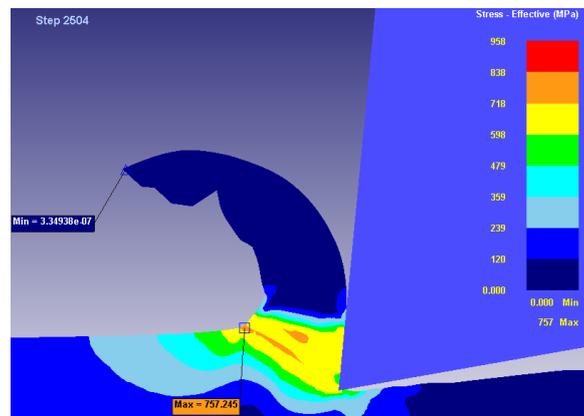


Рис. 13. Зона распределения напряжений в зоне резания при вибрационном точении (в нижнем положении инструмента)
 Fig. 13. Zone of stress distribution in the cutting zone during vibration turning (in the lower position of the tool)

Заключительным параметром для сравнения процессов резания была скорость интенсивности деформаций. Эта величина показывает на сколько быстро протекают процессы деформаций в заготовке при механической обработке, а именно сколько миллиметров деформируются внутри поверхности за определённый период времени.

После моделирования было определено, что при обычном резании создаётся стабильная зона этого параметра. Значения уменьшались пропорционально удалению от точки контакта с режущей кромкой инструмента. Результаты моделирования представлены на рис. 14.

У процесса вибрационного точения зона этого параметра изменялась в зависимости от положения амплитуды режущего инструмента, это отчётливо видно на рис. 15, 16 и 17. В момент верхнего положения амплитуды давление на обрабатываемую

поверхность максимально, поэтому значения находятся пиковых величин и увеличивают свою концентрацию по всей зоне действия напряжений, это положительно сказывается на деформации материала в этом направлении, это представлено на рис. 15.

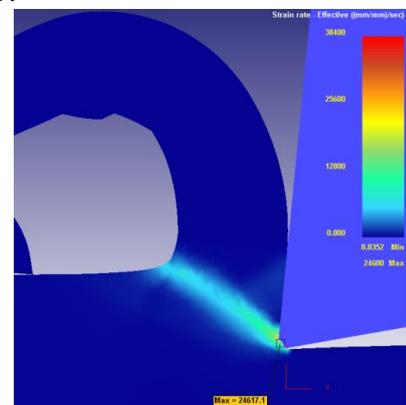


Рис. 14. Скорость интенсивности деформаций при обычном точении
 Fig. 14. Strain intensity rate for conventional turning

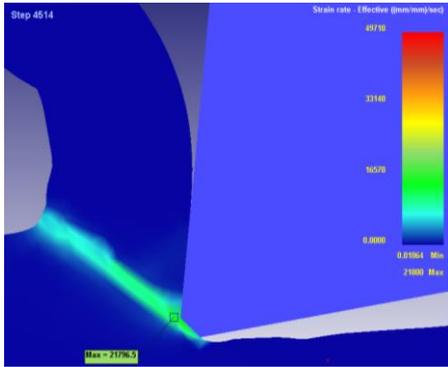


Рис. 15. Скорость интенсивности деформаций при вибрационном точении (в верхнем положении инструмента)

Fig. 15. The rate of the intensity of deformations during vibration turning (in the upper position of the tool)

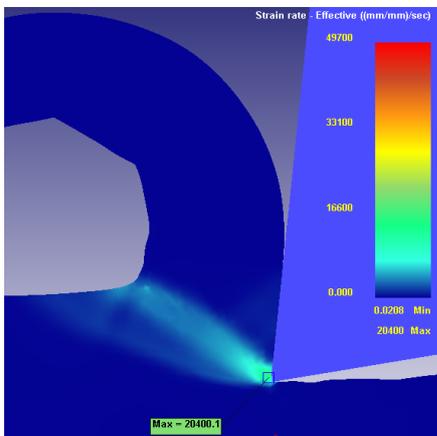


Рис. 16. Скорость интенсивности деформаций при вибрационном точении (в нейтральном положении инструмента)

Fig. 16. The rate of the intensity of deformations during vibration turning (in the neutral position of the tool)

При переходе в нейтральное положение амплитуды происходит перераспределение напряжений и деформаций в зоне резания, тем самым начиная предварительное деформирование второго направления на обрабатываемой поверхности

Обсуждение/Заключение

Проанализировав результаты моделирования можно сделать вывод, что вибрационное точение создаёт ряд факторов, оказывающих положительное влияние на процесс резания. Наиболее эффективно показывает себя процесс вибрационного точения с амплитудой $A = 150$ мкм, частотой $f = 75$ Гц на скорости резания 200 м/мин. В сравнении с другими смоделиро-

(рис. 16). В момент полного перехода в нижнее положение инструмента зона деформаций полностью переходит в нижнюю, ещё не подвергшуюся обработке область. Это показано на рис. 17. Такое распределение деформаций происходит периодически, в момент каждого перехода в нижнее положение амплитуды, тем самым создавая дополнительные предварительные напряжения в теле заготовки, что обеспечивает снижение прочности материала при резании и позволяет достигать перепадов напряжений, которые в свою очередь создают начальную опережающую трещину.

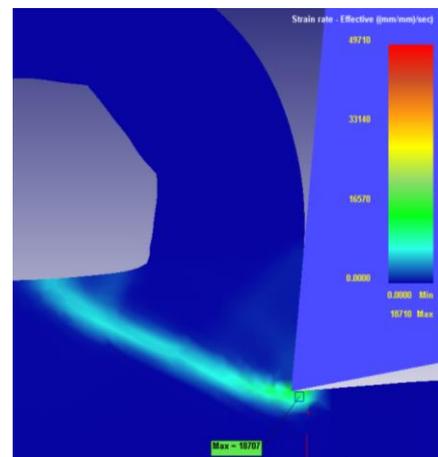


Рис. 17. Скорость интенсивности деформаций при вибрационном точении (в нижнем положении инструмента)

Fig. 17. The rate of the intensity of deformations during vibration turning (in the lower position of the tool)

Это создаёт оптимальные условия для протекания процесса стружкодробления, что увеличивает эффективность процесса вибрационного резания.

ванными процессами он создаёт наиболее значительные перепады в напряжениях и деформациях в зоне резания при достаточно стабильном диапазоне температур, что обеспечивает повышение производительности процесса резания и протекания процесса стружкодробления без интенсивного влияния на увеличение износа инструмента.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Панкин А.В. Обработка металлов резанием. Москва: Машгиз, 1961. 520 с.
2. Рубинштейн С.А., Левант Г.В., Орнис Н.М., Тарасевич Ю.С. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент. Москва: Машиностроение, 1968. 392 с.
3. Яцун Е.И., Емельянов С.Г., Ремнев А.И., Швеиц С.В. Механизм стружкозавивания при резании металлов. *Технология машиностроения*. 2012;5:9–14.
4. Сергиев А.П., Владимиров А.А., Макаров А.В., Швачкин Е.Г. Физические основы процесса вибрационного резания при точении. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017;3:94–102.
5. Sergiev A.P., Vladimirov A.A., Shvachkin E.G. Optimization of Vibrational Cutting. *Russian Engineering Research*. 2017;37(6):505–508.
6. Vladimirov A.A., Afonin A.N., Makarov A.V. Capabilities of vibration cutting at turning of hard-to-cut materials and built-up surfaces. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;747:012063:1–7. doi: [10.1088/1757-899X/747/1/012063](https://doi.org/10.1088/1757-899X/747/1/012063).
7. Vladimirov A.A., Makarov A.V., Martynov E.M. Using vibration cutting for finish turning hard materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1399:044013:1–7. doi: [10.1088/1742-6596/1399/4/044013](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044013).
8. Сергиев А.П., Владимиров А.А., Швачкин Е.Г. К вопросу о физических явлениях в зоне трения. *RUSSIAN SCIENTIST*. 2017;1(1):20–30.
9. Владимиров А.А., Сергиев А.П., Макаров А.В. Моделирование процесса вибрационного точения в программном комплексе DEFORM. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018;5:82 – 85.

REFERENCES

1. Pankin A.V. Metal cutting. Moscow: Mashgiz, 1961. 520 p.
2. Rubinstein S.A., Levant G.V., Ornis N.M., Tarasevich Yu.S. Theoretical fundamentals metal cutting and cutting tools. Moscow: Mashinostroenie, 1968. 392 p.
3. Yatsun E.I., Yemelyanov S.G., Remnev A.I., Shvets S.V. The mechanism of chip wrapping when cutting metals. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2012;5:9–14.
4. Sergiev A.P., Vladimirov A.A., Makarov A.V., Shvachkin E.G. Physical principles of vibration cutting in turning. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017;3:94–102.
5. Sergiev A.P., Vladimirov A.A., Shvachkin E.G. Optimization of Vibrational Cutting. *Russian Engineering Research*. 2017;37(6):505–508.
6. Vladimirov A.A., Afonin A.N., Makarov A.V. Capabilities of vibration cutting at turning of hard-to-cut materials and built-up surfaces. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020;747:012063:1–7. doi: [10.1088/1757-899X/747/1/012063](https://doi.org/10.1088/1757-899X/747/1/012063).
7. Vladimirov A.A., Makarov A.V., Martynov E.M. Using vibration cutting for finish turning hard materials. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1399:044013:1–7. doi: [10.1088/1742-6596/1399/4/044013](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1399/4/044013).
8. Sergueev A.P., Vladimirov A.A., Shvachkin E.G. The problem of physical phenomena in friction zone. *RUSSIAN SCIENTIST*. 2017;1(1):20–30.
9. Vladimirov A.A., Sergiev A.P., Makarov A.V. Modeling of the vibration turning in DEFORM software application. *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 2018;5:82 – 85.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Корендясев, Г. К.** О конечно-элементном моделировании процесса обработки металлов резанием (часть 2) / Г. К. Корендясев // Вестник научно-технического развития. – 2015. – № 3 (91). – С. 14–24.
2. **Jemielniak, K.** Identification of Dynamic Cutting Force Coefficients by Direct Measurement of Cutting Forces During Vibratory Cutting / K. Jemielniak, M. Nejman, D. Sniegulska-Gradzka // Journal of Machine Engineering. – 2016. – Vol. 16. – No 3. – pp. 47–57.
3. **Ma, L.** Research on the Vibration Cutting and the Simulation / L. Ma, Y. Chen, J. Wu, Y. Hou // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 174. – pp. 286–289.
4. **Śniegulska-Grządka, D.** Cutting force coefficients determination using vibratory cutting / D. Śniegulska-Grządka, M. Nejman, K. Jemielniak // 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering – CIRP ICME '16. Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 62. – P. 205–208.
5. **Wu, J.-M.** Vibration Cutting Mechanism and its Application / J.-M. Wu, L.-E. Ma, Y.-P. Hou // Zhendong yu Chongji. – 2012. – Vol. 31. – No 3. – pp. 88–91.

BIBLIOGRAPHIC LIST

1. **Korendyasev, G. K.** On finite element modeling of metal cutting (part 2) / G. K. Korendyasev // *Bulletin of Scientific and Technical Development*. – 2015. – № 3 (91). – pp. 14–24. Jemielniak, K. Iden-

- tification of Dynamic Cutting Force Coefficients by Direct Measurement of Cutting Forces During Vibratory Cutting / K. Jemielniak, M. Nejman, D. Śniegulska-Grądzka // Journal of Machine Engineering. – 2016. – Vol. 16. – No 3. – pp. 47–57.
2. **Ma, L.** Research on the Vibration Cutting and the Simulation / L. Ma, Y. Chen, J. Wu, Y. Hou // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 174. – pp. 286–289.
 3. **Śniegulska-Grądzka, D.** Cutting force coefficients

- determination using vibratory cutting / D. Śniegulska-Grądzka, M. Nejman, K. Jemielniak // 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering – CIRP ICME '16. Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 62. – P. 205–208.
4. **Wu, J.-M.** Vibration Cutting Mechanism and its Application / J.-M. Wu, L.-E. Ma, Y.-P. Hou // Zhendong yu Chongji. – 2012. – Vol. 31. – No 3. – pp. 88–91.

Информация об авторах:

Кудинов Егор Алексеевич, студент 2-го курса, спец. «Технологические машины и оборудование», тел. +7-919-437-70-08.

Владимиров Александр Андреевич, кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, тел. +7-920-560-51-85, Scopus-Author ID 57214578618, Research- ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID-РИНЦ 818516.

Макаров Алексей Владимирович, кандидат тех-

Kudinov Egor Alekseevich, second-year student of the speciality “Technological Machines and Equipment”, phone: +7-919-437-70-08.

Vladimirov Aleksander Andreevich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht, phone: +7-920-560-51-85, Scopus-Author ID 57214578618, Research- ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID- RSCI 818516.

Makarov Aleksey Vladimirovich, Candidate of

нических наук, доцент, зав. кафедрой технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, тел. +7-920-561-92-20, Scopus-Author ID 57213743174, Research- ID-Web of Science AAX-1304-2020, Author-ID-РИНЦ 749263.

Шаповалов Антон Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, тел. +7-903-884-37-84, Author-ID-РИНЦ 477668.

Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht, phone: +7-920-561-92-20, Scopus-Author ID 57213743174, Research- ID-Web of Science AAX-1304-2020, Author-ID-RSCI 749263.

Shapovalov Anton Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht, phone: +7-903-884-37-84, Author-ID- RSCI 477668.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.10.2021; одобрена после рецензирования 15.12.2021; принята к публикации 18.02.2022. Рецензент – Алгабачиев А.Ю., доктор технических наук, профессор, заведующий отделом Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 29.10.2021; approved after review on 15.12.2021; accepted for publication on 18.02.2022. The reviewer is Algabachiev A.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.