

УДК 621.923

В.А. Федорович, д-р техн. наук, Е.В. Островерх, канд. техн. наук,  
Н.В. Козакова, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

*Наведено результати комп'ютерного динамічного моделювання процесу алмазного виглажування методом кінцевих елементів у програмному пакеті Third Wave AdvantEdge. Встановлено вплив модуля пружності оброблювального матеріала, радіуса виглажувача, глибини й швидкості виглажування на величину напруг у зоні обробки*

**Ключові слова:** алмазне виглажування, комп'ютерне моделювання процесу обробки, пластична деформація, модуль пружності, режими виглажування

*Приведены результаты компьютерного динамического моделирования процесса алмазного выглаживания методом конечных элементов в программном пакете Third Wave AdvantEdge. Установлено влияние модуля упругости обрабатываемого материала, радиуса выглаживателя, глубины и скорости выглаживания на величину напряжений в зоне обработки*

**Ключевые слова:** алмазное выглаживание, компьютерное моделирование процесса обработки, пластическая деформация, модуль упругости, режимы выглаживания

*The results of the computer simulation of the process of diamond smoothing by the finite element method in the software package Third Wave AdvantEdge are presented. The effect of the modulus of elasticity of the processed material, the radius of the smoother, the depth and the speed of smoothing on the value of stresses in the treatment zone is established*

**Keywords:** diamond smoothing, computer simulation of the processing process, plastic deformation, modulus of elasticity, smoothing modes

Современные тенденции создания наукоемкой продукции характеризуются широким применением компьютерных математических приложений, главным преимуществом использования которых является существенное сокращение объема экспериментальных исследований при подготовке и планировании производства новой продукции. Развитие вычислительной техники открывает перспективы разработки трехмерной методологии комплексного исследования технологических процессов обработки деталей машин с целью повышения их эффективности и улучшения эксплуатационных свойств изготавливаемой продукции. Создание методологии трехмерного компьютерного моделирования процессов обработки, в том числе и методом алмазного выглаживания, позволяет повысить их стабильность и эффективность, добиться повышения стойкости инструмента и качества продукции, определить оптимальные параметры технологических операций [1].

Идеология компьютерного моделирования процесса алмазного выглаживания включает несколько элементов:

- исследование влияния механических свойств обрабатываемого материала, в частности, модуля упругости, на эффективность и стабильность процесса;

- определение оптимальных режимов процесса для получения необходимых остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое детали;

- определение оптимальной геометрии инструмента для различных материалов;

- определение условий, исключающих возможность повышенного износа или разрушения алмазного выглаживателя вследствие превышения допустимых температур и эквивалентных напряжений;

Решение поставленных задач экспериментальным путем является чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому компьютерное моделирование в сочетании с планированием модельных экспериментов процесса алмазного выглаживания позволяют максимально быстро осуществлять его оптимизацию.

С этой целью использовался специализированный программный комплекс Third Wave Advantedge, основанный на методе конечных элементов и позволяющий моделировать процессы механической обработки в динамике в 2D и 3D пространстве. [2]. Возможность рассчитывать температуры и силы, которые действуют в системе инструмент–заготовка, эквивалентные напряжения в процессе обработки, пластические деформации, остаточные напряжения и др., загружать в программу, кроме стандартных инструмента и заготовок, собственные CAD-модели, траектории и параметры их движения, выбирать их материалы из большого каталога программы или создавать самостоятельно, задавать начальные условия, а также учитывать влияние СОТС, позволяет расширить охват технологических процессов и использовать Third Wave Advantedge для моделирования процесса алмазного выглаживания. Введение в построенную модель физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, режимов обработки, позволило рассчитать эквивалентные и остаточные напряжения, энергию деформации, плотность энергии деформации, главные напряжения, силы и температуру в зоне пластической деформации при выглаживании. Пакет позволяет исследовать как одиночное, так и комплексное влияние параметров на результат обработки. Решение данных задач в Third Wave AdvantEdge осуществлялось по следующему алгоритму.

1. Построение геометрической модели, при котором используемые элементы ранжируются по возрастанию приоритетов:  $pt \rightarrow cr \rightarrow sf \rightarrow vl$  (точка  $\rightarrow$  линия  $\rightarrow$  поверхность  $\rightarrow$  объем). При алмазном выглаживании с использованием элементов  $sf$  создавалась двухмерная модель системы «алмазная головка выглаживателя–заготовка», выполненная в сечении плоскостью, заданной вектором движения и осью инструмента (рис. 1).

2. Задание свойств материалов для каждого элемента системы происходило с использованием стандартной базы данных. В качестве свойств материалов использовались модуль упругости, коэффициент Пуассона, массовая плотность, коэффициент термического расширения, теплопроводность, удельная теплоемкость и др.

3. Разбиение построенной модели на конечные элементы: на базе геометрической модели, состоящей из точек, линий, поверхностей и объемов ( $pt$ ,  $cr$ ,  $sf$ ,  $vl$ ), создается модель, состоящая из узлов ( $nd$ ) и элементов ( $el$ ) (рис. 2). Также задавались параметры динамического изменения сетки конечных элементов: в зоне деформации создавалась сеть, элементы которой значительно уменьшены. В процессе пластической деформации сетка конечных элементов становилась еще более мелкодисперсной (размер элементов менее 1 мкм) в соответствии с заданным коэффициентом уменьшения. В зоне отсутствия деформаций элементы сетки росли для ускорения процесса расчетов [3].

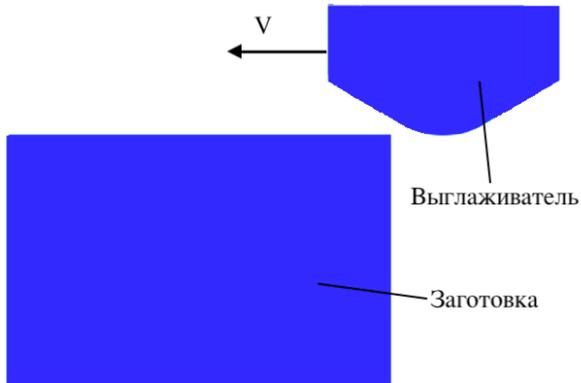


Рисунок 1 – Двухмерная модель системы «выглаживатель–заготовка»

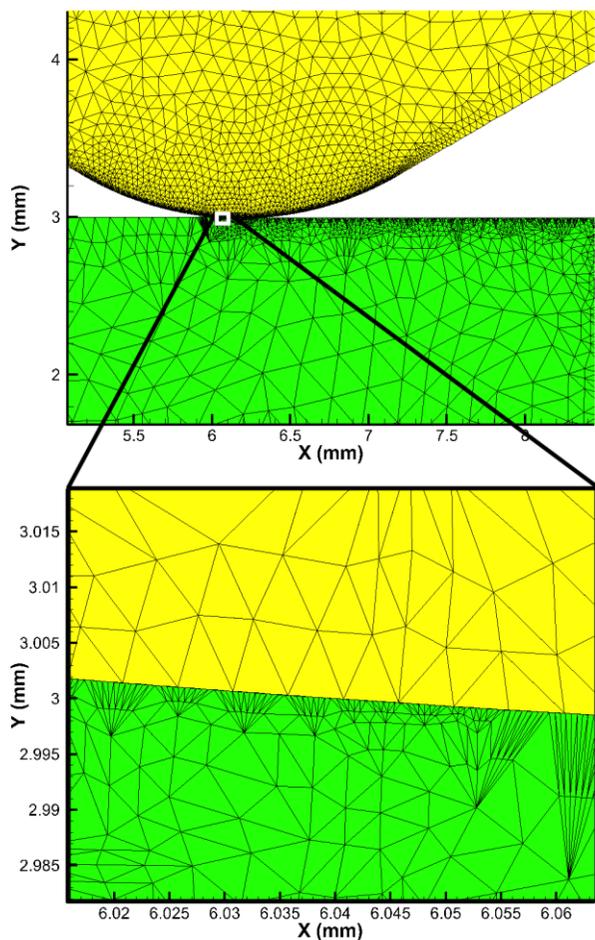
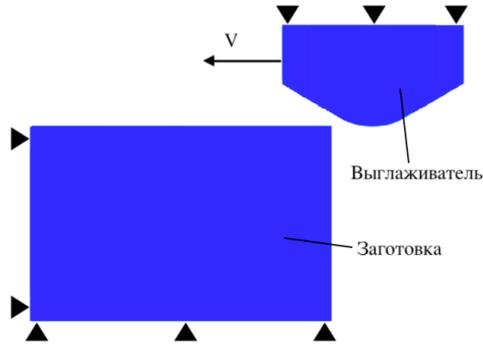
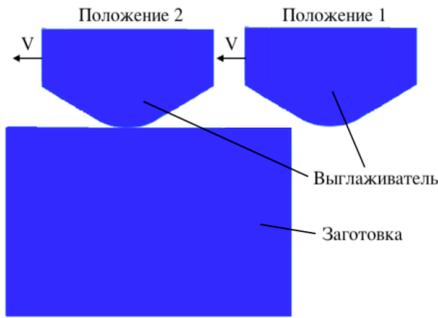


Рисунок 2 – Разбиение исходной модели на конечные элементы

4. Закрепление модели из конечных элементов производилось в узлах (рис. 3 а) и задание движения выглаживателя (рис. 3 б).



а)



б)

Рисунок 3 – Схематичное представление: закрепления модели (а) и задания движения выглаживателя (б)

Так как процесс выглаживания представляет собой сложную динамическую систему, в которой на результат влияет множество параметров [4], для экспериментального исследования процесса алмазного выглаживания в программном пакете Third Wave Advantedge использовался многофакторный эксперимент по плану В4 [5]. В качестве наиболее значимых параметров были выбраны четыре основных:

- модуль упругости обрабатываемого материала;
- скорость выглаживания;
- глубина выглаживания;
- радиус рабочей поверхности выглаживателя.

При подготовке имитационного моделирования в Third Wave Advantedge глубина и скорость выглаживания задавались в меню технологических параметров процесса. Значения необходимых физико-механических свойств,

соответствующие реальным обрабатываемым алмазным выглаживанием материалам, выбирались из встроенной в программный пакет библиотеки.

Основной задачей обработки результатов моделирования было изучение распределения эквивалентных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали, от значений и распределения которых зависит результат, получаемый при выглаживании – пластическое деформирование и упрочнение выглаживаемой поверхности, а также распределение в ней остаточных сжимающих напряжений. Данные показатели значительно улучшают такие эксплуатационные свойства готовой детали как износостойкость, сопротивление усталости, надежность, ресурс и качество поверхности готовой детали [6].

В ходе имитационного моделирования было выявлено значительное отличие в распределении эквивалентных напряжений в зависимости от модуля упругости обрабатываемого материала, чье влияние оказалось наиболее значительным по сравнению с остальными исследуемыми факторами (рис. 4).

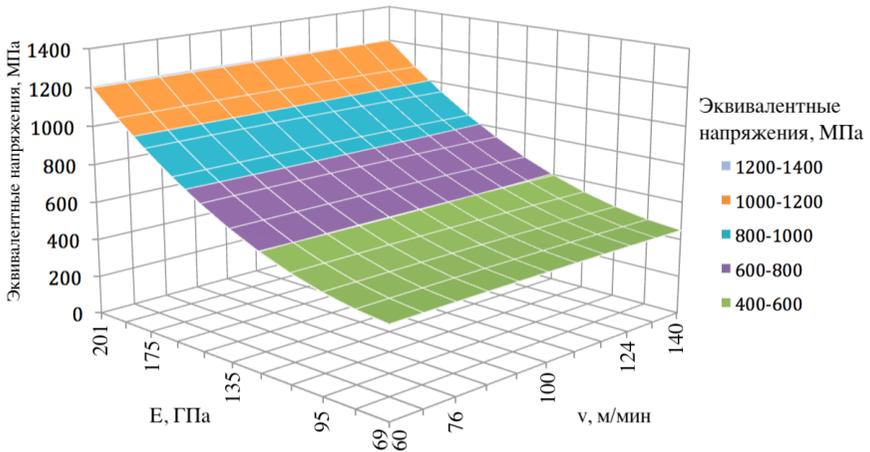


Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали в зависимости от модуля упругости обрабатываемого материала  $E$  и скорости выглаживания  $v$

При уменьшении модуля упругости обрабатываемого материала происходит значительный спад эквивалентных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали. При его увеличении обрабатываемый материал оказывает большее сопротивление деформации при поверхностном пластическом деформировании, что приводит к значительному увеличению эквивалентных напряжений как в поверхностном слое обрабатываемой детали, так и в материале инструмента. Увеличение эквивалентных

напряжений в поверхностном слое приводит к усилению его напряженно-деформированного состояния, от которого напрямую зависит упрочнение поверхности детали [7]. Таким образом, материалы, имеющие больший модуль упругости, имеют лучшие показатели упрочнения поверхностного слоя при обработке методом алмазного выглаживания.

Изменение проекций силы выглаживания показали, что составляющая силы в направлении, противоположном направлению скорости, для всех трех значений модуля упругости неизменно составляет в 50–60 Н. В то же время, сила, действующая в осевом направлении инструмента, существенно растет вместе с ростом модуля упругости обрабатываемого материала (рис. 5).

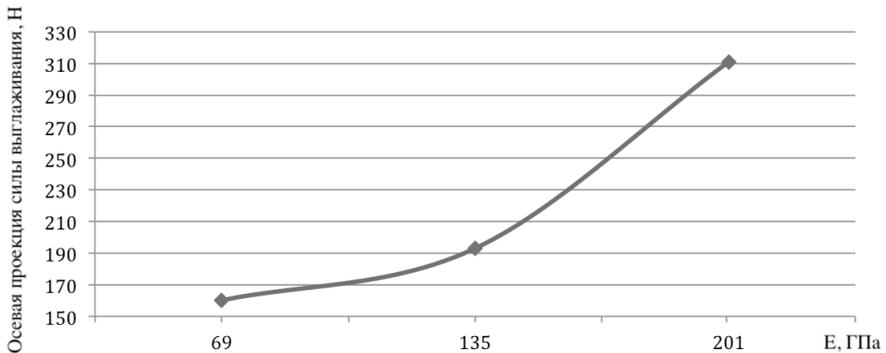


Рисунок 5 – Зависимость осевой проекции силы выглаживания от модуля упругости  $E$  обрабатываемого материала: 1)  $E = 69$  ГПа – алюминиевый сплав *EN AW 2024-T4*; 2)  $E = 135$  ГПа – никель-алюминиевая бронза *C95500 (CuAl11Fe4Ni4)*; 3)  $E = 201$  ГПа – сталь 45

Обработка материалов с большим модулем упругости также вызывает увеличение механических нагрузок на инструмент. Для выявления зависимости эквивалентных напряжений в алмазе выглаживателя от модуля упругости обрабатываемого материала был проведен однофакторный эксперимент, исходные данные и результат которого приведены в таблице 1.

Значительный рост эквивалентных напряжений в алмазе выглаживателя, достигающих пределов прочности материала, может приводить к уменьшению его стойкости, повреждению рабочей поверхности кристалла и выходу инструмента из строя (рис. 6). С этой позиции анализировались режимы выглаживания и геометрия инструмента.

Скорость выглаживания имеет определяющее влияние на производительность процесса. Ограничивающим фактором, влияющим на скорость и соответственно на производительность технологического процесса в целом, является теплостойкость алмаза. Наибольшая скорость

выглаживания, ограничиваемая теплостойкостью алмаза, равна 400–600 м/мин. Но при выглаживании железоуглеродистых материалов уже при скорости 200 м/мин повышение температуры в зоне выглаживания приводит к значительному ускорению износа кристалла из-за графитизации алмаза и диффузионных процессов [8]. Работа в таких режимах не является целесообразной, что наиболее выражено проявляется при обработке стали.

Таблица 1 – Исходные данные и результат однофакторного эксперимента для изучения механической нагруженности инструмента

Наименование	Значение		
Радиус рабочей поверхности алмаза, $R$ , мм	2		
Скорость выглаживания, $v$ , м/мин	100		
Глубина выглаживания, $t$ , мкм	8		
Модуль упругости обрабатываемого материала, $E$ , ГПа	69	135	201
Эквивалентные напряжения в алмазе выглаживателя, МПа	794	978	1473

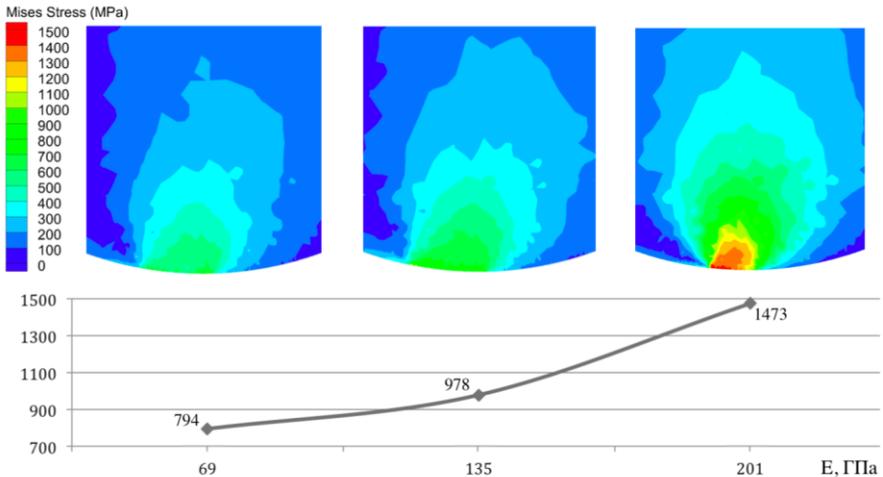


Рисунок 6 – Изменение напряжений в алмазе выглаживателя в зависимости от модуля упругости  $E$  обрабатываемого материала

Влияние режимов выглаживания на эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали показано на рисунке 7.

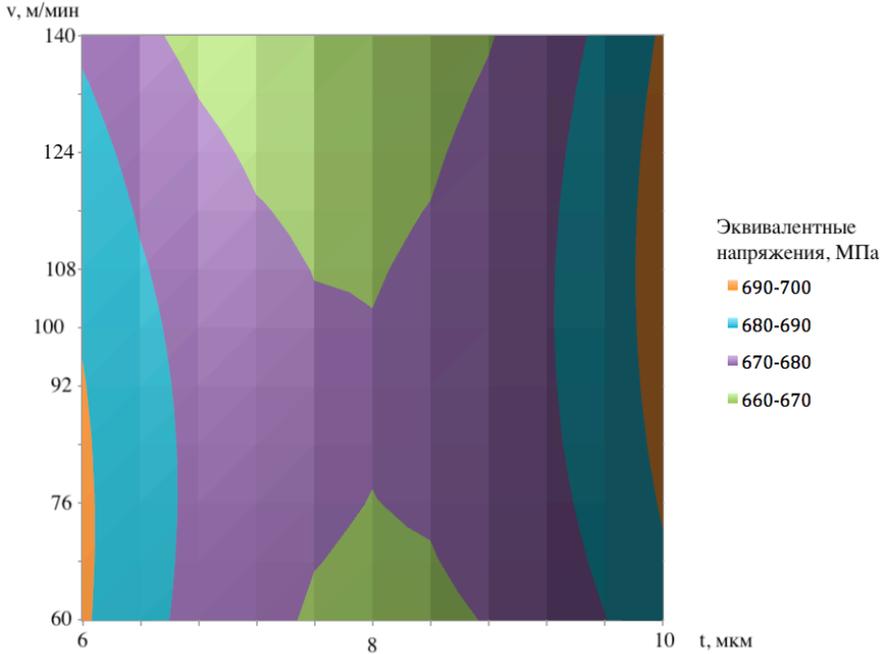


Рисунок 7 – Зависимость эквивалентных напряжений в поверхностном слое обрабатываемой детали от скорости  $v$  и глубины выглаживания  $t$

Анализ результатов расчета показал, что при изменении скорости выглаживания от 60 до 140 м/мин эквивалентные напряжения в материале детали в процессе обработки изменяются всего на 3–4 %. Таким образом, скорость выглаживания практически не влияет на упрочнение поверхности детали. Поэтому для достижения максимальной производительности обработки необходимо задавать максимально возможные значения скорости выглаживания, которые не будут приводить к превышению критических температур для алмаза и интенсивному износу выглаживателя.

График изменения температуры алмаза при обработке стали 45 методом алмазного выглаживания показан на рисунке 8. Расчет производился для инструмента с радиусом рабочей поверхности 2 мм при скорости выглаживания 100 м/мин и глубине выглаживания 8 мкм. Максимальное значение температуры инструмента составило 146,9 °С.

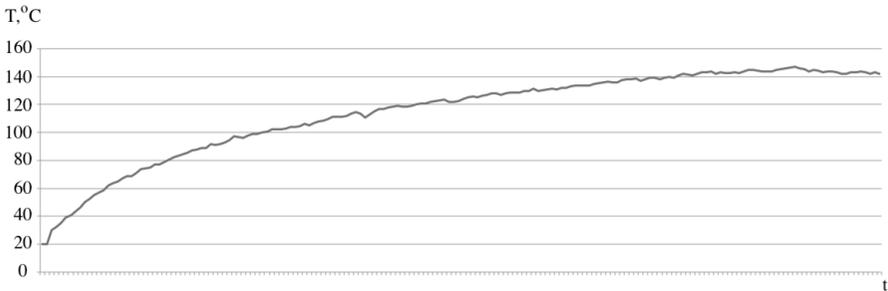


Рисунок 8 – График изменения температуры алмаза от времени выглаживания  $t$  (мин) при обработке стали 45

Для повышения производительности процесса выглаживания и уменьшения износа инструмента целесообразно использовать различные способы улучшения теплоотвода из зоны обработки – использование СОТС, оптимизация инструмента с целью увеличения его теплоотдачи (теплопроводный материал выглаживателя и припой, закрепляющего алмаз в инструменте; максимально возможная площадь соприкосновения припоя с поверхностью алмаза; оптимизация формы инструмента за счет ребер охлаждения).

Влияние глубины выглаживания на эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали, как показало моделирование, также невелико (рис. 7). Поэтому, для обеспечения оптимального результата обработки, глубина выглаживания должна быть достаточной для полного сглаживания микронеровностей поверхности заготовки, но при этом не превышать значений, после которых появляются вибрации, ухудшающие качество обработанной поверхности [9].

Под изменением геометрии рабочей поверхности выглаживателя, имеющего сферическую форму, понималось варьирование ее радиуса. На рисунке 9 показано влияние радиуса рабочей поверхности алмаза на эквивалентные напряжения в поверхностном слое заготовки для обрабатываемых материалов с различными модулями упругости.

Геометрия инструмента имеет различное влияние на эквивалентные напряжения в поверхностном слое деталей при обработке различных материалов. При относительно низком модуле упругости обрабатываемого материала радиус рабочей поверхности алмаза практически не имеет влияния на значения эквивалентных напряжений в поверхностном слое. Но при его росте геометрия рабочей поверхности приобретает все большее значение.

Моделирование показало значительное влияние радиуса рабочей поверхности алмаза на эквивалентные напряжения в поверхностном слое при обработке стали 45. Изменение радиуса от 3 до 1 мм вызвало значительный

рост напряжений в материале детали, что благоприятно влияет на результат обработки, приводя к увеличению показателей упрочнения обрабатываемой поверхности и увеличению в ней остаточных сжимающих напряжений.

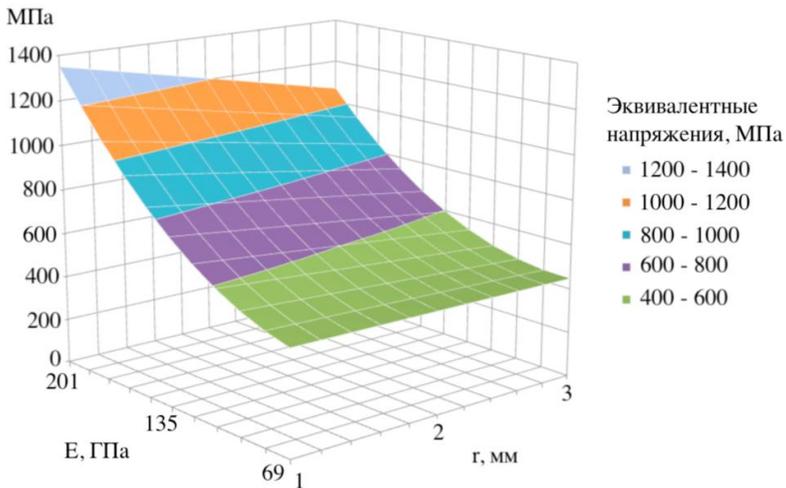


Рисунок 9 – Влияние радиуса рабочей поверхности алмаза выглаживателя на эквивалентные напряжения в поверхностном слое заготовки для материалов с различным модулем упругости

Для определения рациональной величины радиуса рабочей поверхности инструмента для обработки стали 45 было изучено влияния радиуса на эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали и алмазе инструмента (рис. 10).

Изменение радиуса рабочей поверхности алмаза с 3 до 1 мм приводит к увеличению напряжений в алмазе с 1391 до 1539 МПа и в поверхностном слое заготовки с 1056 до 1383 МПа. Соответственно полезный прирост эквивалентных напряжений в поверхностном слое стали 45 при обработке инструментом с радиусом рабочей поверхности 1 мм составил 327 МПа, что соответствует 31 %. При этом рост напряжений в самом алмазе на 148 МПа или 10,6 % не оказывает значительного влияния на износ инструмента.

Таким образом, для материалов с большим модулем упругости, целесообразно использовать выглаживатели с меньшим радиусом рабочей поверхности. Для материалов с относительно небольшим модулем упругости и небольшой твердостью выглаживатель меньшего радиуса не дает преимуществ в упрочнении поверхностного слоя обрабатываемой детали. Такие материалы целесообразно обрабатывать выглаживателями больших радиусов, так как они обеспечивают меньшую шероховатость поверхности. В

частности, для стали 45 рекомендуется использовать выглаживатели с радиусом рабочей поверхности от 1 до 1,3 мм, а для алюминиевых сплавов и бронз от 3 до 3,5 мм.

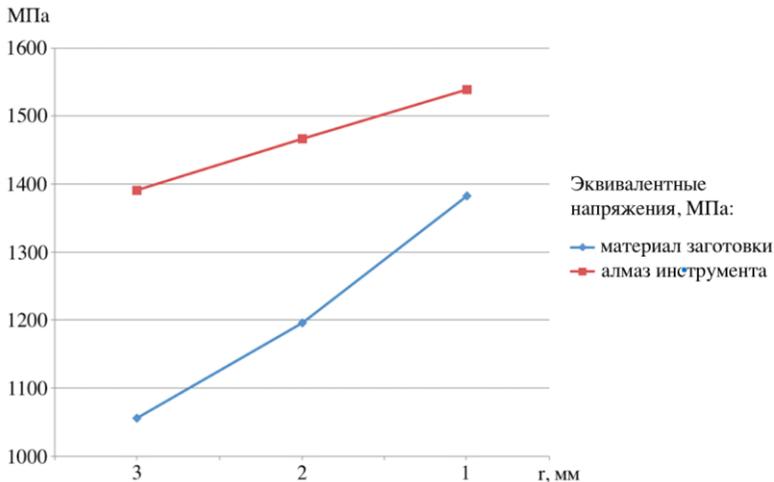


Рисунок 10 – Влияние радиуса рабочей поверхности инструмента на эквивалентные напряжения в поверхностном слое обрабатываемой детали и алмазе выглаживателя при обработке стали 45

(скорость выглаживания  $v = 140$  м/мин, глубина выглаживания  $t = 6$  мкм)

Компьютерное моделирование процесса алмазного выглаживания в программном комплексе Third Wave Advantedge показало:

- рост модуля упругости обрабатываемого материала приводит к значительному росту эквивалентных напряжений и сил выглаживания в нем, что вызывает усиление его напряженно-деформированного состояния, от которого непосредственно зависит упрочнение поверхности детали. Поэтому материалы, имеющие больший модуль упругости, имеют лучшие показатели упрочнения поверхностного слоя при алмазного выглаживании;

- изменение скорости и глубины выглаживания практически не влияет на напряжения в обрабатываемом материале, при этом рост скорости, увеличивающий производительность обработки, повышает температуры в зоне обработки. Во избежание термоизноса алмаза выглаживателя при высоких скоростях необходимо оптимизировать теплоотвод из зоны обработки, используя СОТС и инструмент с повышенной теплоотдачей;

- влияние радиуса рабочей поверхности инструмента возрастает с ростом модуля упругости обрабатываемого материала: чем он выше, тем меньший радиус рабочей поверхности выглаживателя обеспечивает

необходимое упрочнение обрабатываемой поверхности. И чем меньше модуль упругости выглаживаемого материала, тем больший радиус рабочей поверхности инструмента рекомендуется применять для достижения малой величины шероховатости обрабатываемой поверхности.

**Список использованных источников:** 1. *Титов А. В.* Моделирование повторной операции выглаживания методом конечных элементов / *А. В. Титов, Л. В. Шмелева, Е. А. Кириенко, О. В. Герасимова* // *Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов.* – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 81–86. 2. *Advantedge, Third Wave Systems* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // [www.thirdwavesys.com/advantedge](http://www.thirdwavesys.com/advantedge) – 06.02.2018 г. – Загл. с экрана. 3. *Криворучко Д.В.* Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы: монография / *Д.В. Криворучко, В.А. Залого*; под общ. ред. В.А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2012. – 496 с. 4. *Торбило В.М.* Алмазное выглаживание. – М.: Машиностроение, 1972. – 104 с. 5. *Спиридонов А. А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / *А. А. Спиридонов.* – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с. 6. *Суслов А.Г.* Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с. 7. *Смелянский В.М.* Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с. 8. *Клименко С. А.* Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / *С. А. Клименко*; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск: Беларуская наука, 2017. – 376 с. 9. *Кузнецов В.П.* Имитационное моделирование влияния параметров технологической системы на виброустойчивость выглаживания поверхностей деталей // *Металлообработка.* – 2010. – № 1 (55). – С. 7–15.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Titov A. V.* Modelirovanie povtornoj operacii vyglazhivaniya metodom konechnyh elementov / *A. V. Titov, L. V. Shmeleva, E. A. Kirienko, O. V. Gerasimova* // *Obработка materialov davleniem: Sbornik nauchnyh trudov.* – Kramatorsk: DGMA, 2015. – № 2 (41). – S. 81–86. 2. *Advantedge, Third Wave Systems* [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: // [www.thirdwavesys.com/advantedge](http://www.thirdwavesys.com/advantedge) – 06.02.2018 g. – Zagl. s ekrana. 3. *Krivoruchko D.V.* Modelirovanie processov rezaniya metodom konechnyh elementov: metodologicheskie osnovy: monografiya / *D.V. Krivoruchko, V.A. Zaloga*; pod obsh. red. V.A. Zalogi. – Somy: Universitetskaya kniga, 2012. – 496 s. 4. *Torbilo V.M.* Almaznoe vyglazhivanie. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 104 s. 5. *Spiridonov A. A.* Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tehnologicheskikh processov / *A. A. Spiridonov.* – M.: Mashinostroenie, 1981. – 184 s. 6. *Suslov A.G.* Kachestvo poverhnostnogo sloya detalej mashin. – M: Mashinostroenie, 2000. – 320 s. 7. *Smelyanskiy V.M.* Mehanika uprochneniya detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. – M.: Mashinostroenie, 2002. – 300 s. 8. *Klimenko S. A.* Finishnaya obrabotka poverhnostej pri proizvodstve detalej / *S. A. Klimenko*; pod obsh. red. S. A. Chizhika i M. L. Hejfecy. – Minsk: Belaruskaya nauka, 2017. – 376 s. 9. *Kuznecov V.P.* Imitacionnoe modelirovanie vliyaniya parametrov tehnologicheskoy sistemy na vibroustojchivost vyglazhivaniya poverhnostej detalej // *MetallООработка.* – 2010. – № 1 (55). – С. 7–15.

*Надійшла до редколегії 25.06.2018*