

УДК 621.923.9:004.94

Н.В. Гончар, канд. техн. наук, Э.В. Кондратюк, канд. техн. наук,  
Д.Н. Степанов, М.В. Кучугуров, Запорожье, Украина

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Запропоновано методика комп'ютерного моделювання процесу полірування дисковим полімерно-абразивним інструментом, яку розроблено з метою вивчення поведінки пружних полімерних волокон у зоні різання, пояснення результатів, отриманих безпосередньо на верстаті, аналізу напружено-деформованого стану інструмента та деталі, а також з метою вибору раціональних режимів обробки та параметрів інструменту.*

*Предложена методика компьютерного моделирования процесса полирования дисковым полимерно-абразивным инструментом, разработанная с целью изучения поведения упругих полимерных волокон в зоне резания, объяснения результатов, полученных непосредственно на станке, анализа напряженно-деформированного состояния инструмента, а также с целью выбора рациональных режимов обработки и параметров инструмента.*

*The technique of computer simulation of polymer-disk polishing abrasive tool, developed to study the behavior of the elastic polymer fibers in the cutting zone, an explanation of the results obtained directly on the machine, the analysis of the stress-strain state of the instrument, as well as to the selection of rational treatment modes and parameters of the tool.*

Как известно, большинство деталей газотурбинных двигателей (ГТД) в силу своей специфики являются тонкостенными и сложнопрофильными, поэтому выбор метода финишной обработки для них часто становится проблемой. Не только из-за требований высокого качества поверхности, небольшого силового воздействия, необходимости обрабатывать труднодоступные участки, удалять заусенцы, скруглять острые кромки, непосредственно полировать плоские и фасонные участки с высокой производительностью. А также необходимо учитывать разнообразие и труднообрабатываемость жаропрочных сталей и сплавов, из которых изготавливают детали ГТД, необходимость минимизации ручного труда, т.е. возможность механизации и автоматизации, а также минимальное загрязнение окружающей среды [1].

Предварительные исследования показали, что финишная обработка инструментом на основе полимерно-абразивных волокон (рис. 1) [2] при правильном подборе режимов и параметров является конкурентноспособной альтернативой известным методам. Сложность состоит в том, что полимерно-

абразивные инструменты являются относительно новыми и недостаточно изученными, литературных данных по ним мало, особенно по обработке таких специфических материалов, как авиационные стали и сплавы.

Целью данной работы являлось изучение процесса обработки образцов из титанового сплава ВТ8-М полимерно-абразивным инструментом (ПАИ) дискового типа, в том числе и с помощью виртуального моделирования.

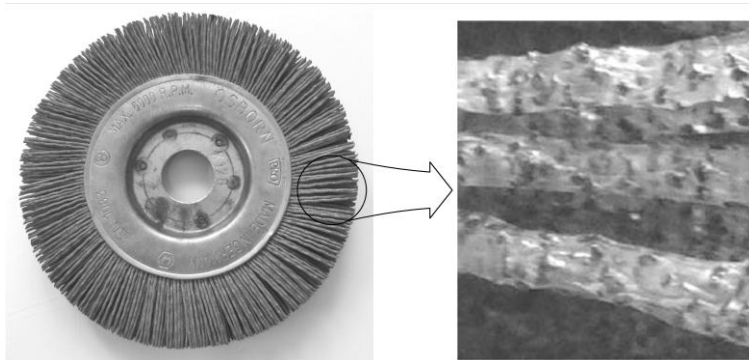


Рисунок 1 – Дисковый инструмент на основе полимерно-абразивных волокон

Титановый сплав ВТ8-М, широко распространенный в авиадвигателестроении. Из него изготавливают лопатки и диски ГТД, в технологическом процессе которых присутствуют финишные операции с применением монотонного ручного труда. Данный сплав – дорогостоящий, в связи с этим количество образцов и возможности проведения широких экспериментальных исследований ограничены.

Необходимо отметить, что применение СОТС, хотя бы в небольшом количестве, обязательно при обработке ПАИ титановых сплавов, так как они обладают низкой теплопроводностью. Полимерная основа волокон ПАИ теряет прочностные свойства при температуре 80...120 °С, поэтому температурный режим требует особого контроля, что однако имеет и свою положительную сторону – гарантировано невысокое температурное воздействие на обрабатываемую поверхность.

Для оценки механизма формирования обработанной поверхности исследовали работу полного дискового ПАИ (рис. 2а) и единичного волокна (рис. 2б) на плоскошлифовальном станке мод. ЗГ71. При обработке с поперечной подачей дискового ПАИ были получены две явно выраженных зоны (рис. 3а): АВ – зона входа (следы локальных ударов), ВС – зона обработки (следы от абразива в виде рисок). При определенных условиях

(ПАИ с неплотным расположением или с разной длиной волокон) появляется третья зона CD – зона выхода волокон из обработки (разнонаправленные следы отдельных волокон).

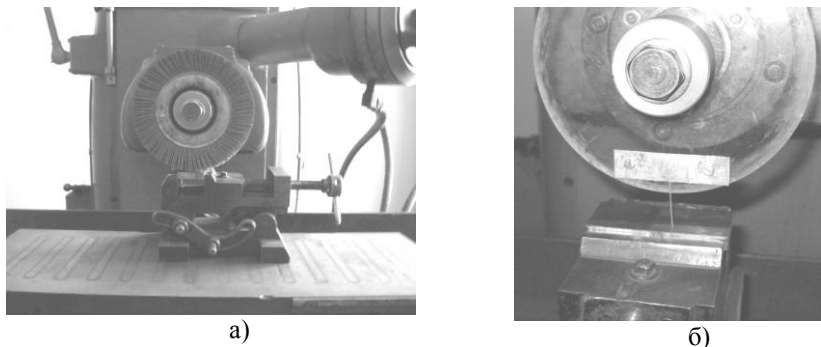


Рисунок 2 – Оборудование и оснастка для исследования дискового ПАИ (а) и единичного волокна (б)

Единичное волокно, закрепленное в ступице, оставляет двойной след с промежутком, полученным в результате его упругого отскока (рис. 3б).

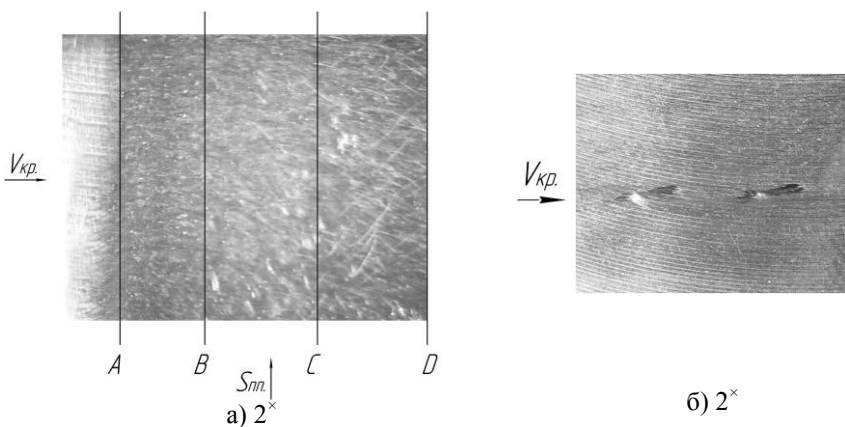


Рисунок 3 – Поверхность образцов после обработки полным ПАИ (а) и единичным волокном (б)

Также было установлено, что обработка дисковым ПАИ обеспечивает уменьшение шероховатости в 2...10 раз и при этом наводит в слое глубиной до 50 мкм остаточные напряжения сжатия величиной -100...-150 МПа.

Степень поверхностного наклепа достигает после обработки 8...18%. Объяснить данные факты можно, изучив кинематику движения волокон ПАИ.

Для рассмотрения особенности поведения упругих волокон в зоне обработки, необходимо специальное высокоскоростное видеоборудование, т.к. при окружной скорости 17 м/сек, волокна находятся в контакте с поверхностью плоского образца 0,0014 секунды. Длина зоны контакта зависит от натяга  $i$ : в случае  $i=1,5$  мм и диаметре ПАИ 75 мм составляет 30 мм. Применение стробоскопа и обычной камеры с приближением не обеспечило качественную съемку, четкое (замедленное в тысячи раз) изображение получить не удалось.

Поэтому было принято решение промоделировать поведение волокон ПАИ с помощью одной из компьютерных прочностных программ, имеющей динамический модуль.

Моделирование процесса механической обработки представляет собой сложную расчетную задачу. Это связано с тем, что в данном процессе учитывается множество входных параметров (геометрия объектов, их расположение, прикладываемые нагрузки) и законы, по которым осуществляются процессы, протекающие в объекте исследования (законы физики, механики, сопротивления материалов и др.).

Моделирование процесса, изменяющегося во времени, приводит к увеличению количества итераций, что в свою очередь влечет за собой увеличение времени расчета и требует значительных компьютерных ресурсов. Можно выделить три основных фактора существенно влияющих на скорость проведения расчетов:  $t$  – общая длительность времени исследуемого процесса,  $\Delta t$  – шаг моделирования (интервал времени, через который осуществляется перерасчет состояния элементов системы) и особенности геометрии изучаемых объектов.

Также при моделировании процессов, в которых осуществляется контакт между двумя и более телами, необходимо учитывать взаимодействие и степень деформации данных тел в зависимости от их геометрии, взаимного расположения, физических свойств материалов и других условий, в которых осуществляется контакт.

С учетом всего вышесказанного была разработана [3] и уточнена следующая методика моделирования процесса обработки образцов полимерно-абразивным инструментом.

Для решения задачи использовали программный конечно-элементный пакет ANSYS, в который входит модуль LS-DYNA, предназначенный для моделирования динамических процессов.

Первый этап: построение трехмерных моделей инструмента и обрабатываемого образца. Его выполняют в любом программном

обеспечении, которое позволяет работать с 3D-моделями. ПАИ имеет следующую конструкцию – цилиндрическая ступица, по периферии которой располагаются волокна (рис. 4а). В рабочей кромке модели волокна располагается модель абразивного зерна (рис. 4б). Форма зерна и параметры инструмента определяются поставленными задачами.

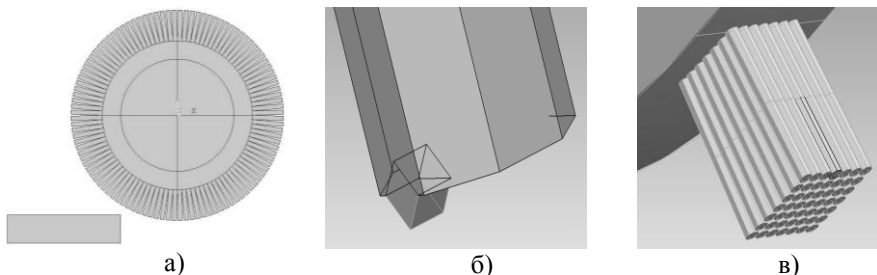


Рисунок 4 – Модели полимерно-абразивного инструмента: полная (а), с включением абразива (б), с волокнами, расположенными в ряд массивом 7×7 (в)

Волокна инструмента имеют цилиндрическую форму, но при построении модели ПАИ они выполняются в виде восьмигранной призмы. Такая форма волокна является более рациональной для разбиения их на конечные элементы и обеспечивает высокую точность и производительность расчетов. Исследование кинематики движения при использовании полной модели ПАИ предусматривает расположение волокон по всей периферии цилиндрической ступицы инструмента, но это существенно уменьшает производительность проведения расчетов. Поэтому при построении модели инструмента было принято решение использовать сектор волокон, которые расположены массивом 7×7 (рис. 4в). Такое расположение волокон является минимально необходимым и в то же время достаточным для корректного моделирования процесса обработки. Модель обрабатываемого образца выполняется в виде прямоугольного параллелепипеда соответствующих размеров.

Второй этап: импорт построенных моделей в программу ANSYS и их доработка. Доработка осуществляется в несколько шагов. Первый шаг – разбивка цилиндрической ступицы инструмента по диаметру так, чтобы она состояла из двух объемов. Это необходимо для правильного задания вращательного движения ПАИ, так как в модуле LS-DYNA при задании вращения твердого тела, его центральная часть должна быть выполнена из абсолютно жесткого недеформированного материала. Вторым шагом является геометрическое «склеивание» всех элементов инструмента в одну модель. При этом происходит физическое присоединение объемов с образованием соединительных кривых и плоскостей. Третий шаг – создание точек оси на

торцевых плоскостях центральной части ступицы. Это необходимо для того, чтобы при разбиении модели на сетку конечных элементов в местах геометрического расположения данных точек были созданы узлы сетки, за которые далее будет осуществляться закрепление модели ПАИ.

Третий этап: разбиение конструкции на конечные элементы (КЭ) определенного типа (SOLID 164 – восьмиузловой КЭ для твердотельных моделей). Конфигурация сетки определяет точность и производительность выполняемых расчетов. При разбиении моделей на КЭ по возможности необходимо получить максимально возможный размер элементов сетки, при этом достаточный для обеспечения точности результатов, а также равномерность элементов сетки в объеме твердого тела (рис. 5).

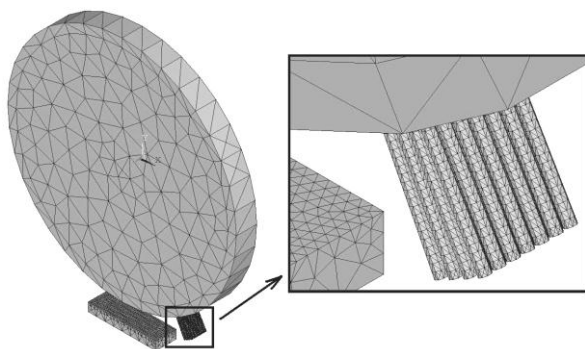


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель полимерно-абразивного инструмента

Следует отметить, что при проведении динамических расчетов в модуле LS-DYNA, число итераций (соответственно интервал времени  $\Delta t$ ) не указывают явно, оно рассчитывается автоматически по минимальным геометрическим размерам конечных элементов: чем меньше размер элемента, тем меньше интервал времени  $\Delta t$ , соответственно тем больше количество итераций. В связи с этим, этап получения сетки КЭ определяет производительность выполняемых расчетов.

Четвертый этап: задание условий контактной задачи и коэффициентов трения для поверхностей контакта.

Пятый этап: закрепление модели и задание нагрузок, эквивалентных реальным условиям процесса обработки. Модель ПАИ закрепляется за центральные (осевые) узлы, ограничивая их перемещение во всех направлениях. Затем задается вращение ПАИ с определенной угловой скоростью. Закрепление модели образца производится по нижней плоскости,

исключив вертикальное перемещение и обеспечивая прямолинейное движение продольной подачи в горизонтальной плоскости. При использовании полной модели ПАИ для ускорения расчетов следует обеспечить предварительный подвод инструмента или образца.

Шестой этап: определение времени обработки, а также временного интервала, через который осуществляется запись результатов (количество шагов). Большое количество шагов приводит к значительному увеличению файла с результатами расчетов, а недостаточное его значение может привести к потере характерных моментов процесса, попавших во временной интервал между моментами записи результата.

Седьмой этап: расчет подготовленной задачи и обработка полученных результатов.

Результаты комбинации динамического анализа и контактной задачи, полученные с помощью пакета ANSYS, объясняют наличие нескольких зон (рис. 3а) на образце при обработке ПАИ (рис. 6). После первого удара о поверхность образца на входе в зону обработки, волокна отскакивают, однако, прижатые последующими рядами волокон, сразу же входят в зону длительного контакта ВС, в процессе которого и происходит непосредственно обработка. Множественные локальные удары волокон в зоне АВ приводят к поверхностно-пластическому деформированию: увеличению микротвердости и сжимающим остаточным напряжениям. При наличии волокон, длина которых несколько превышает средний вылет основной массы волокон ПАИ, одновременно выходящих из зоны обработки, появляется зона CD. Более длинные волокна еще продолжают скользить по поверхности образца, оставляя одиночные разнонаправленные риски, траектория которых обусловлена хаотическим расположением абразивных зерен в волокне, изменяющих направление его движения при отсутствии тесного строя соседних волокон ПАИ.

Полученные результаты позволяют сделать следующий вывод: несмотря на то, что изнашиваемые частички волокон удаляются, открывая новые абразивные зерна, и стойкость его высока из-за низких силовых и температурных составляющих процесса обработки, однако из-за утончения и «разломачивания» концов волокон или появления на них следов оплавления все же периодически необходимо ПАИ подвергать правке. Это необходимо для обеспечения производительности и высоких классов чистоты обрабатываемой поверхности ( $Ra$  0,1...0,2 мкм).

При помощи анимации, полученной моделированием случая единичного волокна (рис. 3б), было установлено, что волокно в свободном вращении после первого удара высоко подскакивает, после чего опять ненадолго контактирует с образцом, оставляя за собой вторую короткую риску. Это происходит из-за отсутствия соседних волокон, которые ограничивали бы

свободное перемещение изучаемого волокна, прижимая его к поверхности образца.

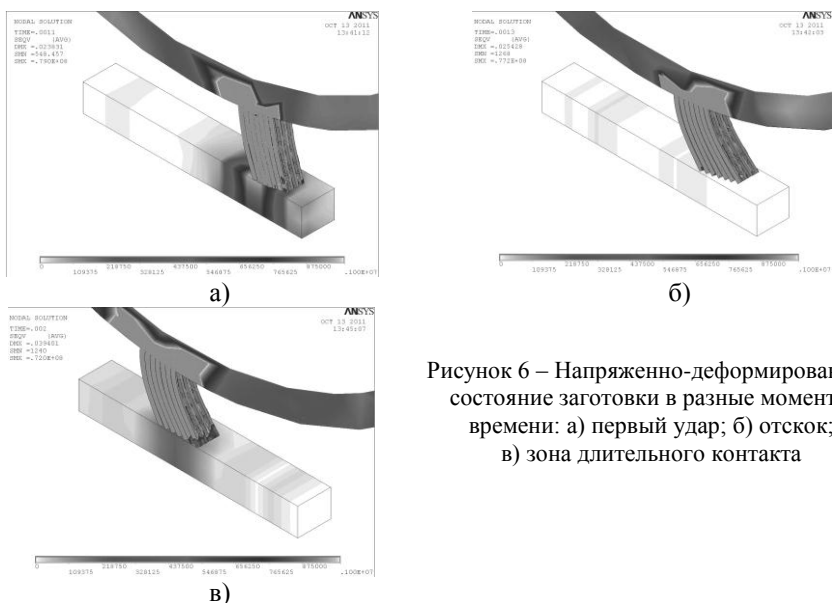


Рисунок 6 – Напряженно-деформированное состояние заготовки в разные моменты времени: а) первый удар; б) отскок; в) зона длительного контакта

При помощи такого моделирования можно изучать поведение волокон по разным схемам расположения их в ступице инструмента (волокно разной длины, расположение волокон вплотную или разрезенно).

Также изучая результаты моделирования, можно оценить нагрузку волокон в разные моменты времени, размещение наиболее нагруженных участков как волокон так и образца, т.е. проанализировать напряженно-деформированное состояние (НДС) системы в динамике (рис. 6).

Предполагая, что наиболее производительная обработка происходит, когда во время контакта «волокно-образец» напряжение на поверхности образца максимальное, проведя сравнительный анализ НДС образца, меняя режимы обработки, параметры инструмента и свойства материала, можно подобрать рациональные режимы для обработки ПАИ.

Для стандартного выбора рациональных режимов в случае натуральных экспериментов необходимо учесть большое количество варьируемых факторов: непосредственно режимы обработки ( $V$  – скорость,  $S$  – продольная подача,  $i$  – натяг,  $N$  – количество двойных ходов) и параметры инструмента ( $L$  – вылет волокон,  $d$  – диаметр волокон, материал и зернистость абразива).



Поэтому выбор рациональных из них даже для обработки одного материала – довольно длительная сложная задача, требующая больших материальных затрат.

На примере получения зависимости максимального эквивалентного напряжения  $\sigma_{max}$  поверхности образца от натяга  $i$  (рис. 7а) для титанового сплава ВТ8-М, в результате расчетов можно утверждать, что рациональный натяг составляет 1,5 мм, что подтверждается результатами натурных экспериментов. При этом максимальное напряжение в волокнах не критическое (рис. 7б), что объясняет высокую стойкость ПАИ.

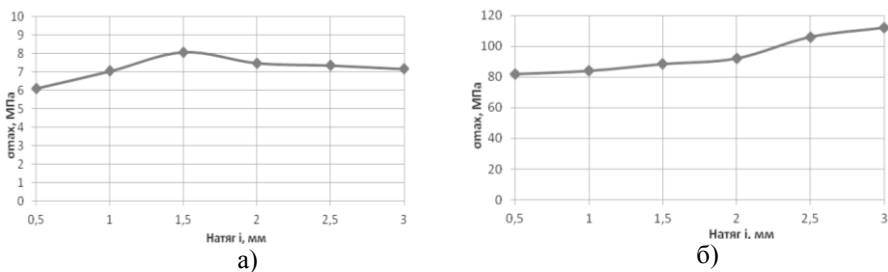


Рисунок 7 – Максимальные эквивалентные напряжения образца (а) и волокна (б)

Таким образом, компьютерное моделирование дает возможность получения ответов на вопросы, касающиеся поведения упругих полимерно-абразивных волокон и образца во время обработки, влияния режимов резания и параметров инструмента на изменение напряженно-деформированного состояния отдельных элементов системы и кинематику, и не требует материальных затрат на проведение экспериментов.

**Список использованных источников:** 1. Богуслаев В.А., Качан А.Я., Калинина Н.Е. и др. Авиационно-космические материалы и технологии. – ОАО «Мотор Сич», – 2009. – 382 с.  
2. Абрашевич Ю.Д., Оглоблинский В.А., Оглоблинский А.В. Щеточные инструменты на основе полимерно-абразивных волокон // Мир техники и технологий. – Харьков, 2006. – №5. – С. 50-52.  
3. Гончар Н.В., Кучугуров М.В., Степанов Д.М. Методика моделювання спільної роботи пружних полімерно-абразивних волокон при контакті з поверхнею зразка // Вісник Житомирського державного технологічного університету – 2011. – №3/58 – С. 9-11.

*Поступила в редколлегию 03.07.2013*