

Баринов С.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
armitr@yandex.ru*

### Моделирование процесса зарождения ударного импульса в очаге деформации.

Для повышения работоспособности и надежности деталей машин в технологии машиностроения успешно применяются методы поверхностного пластического деформирования (ППД) [1-3]. Известно, что с энергетической точки зрения динамическое воздействие при ППД более выгодно по сравнению со статическим, особенно при формировании большой глубины упрочнения. При этом значительным недостатком динамических (ударных) методов является то, что энергия удара расходуется на пластическую деформацию нерационально. Это связано с тем, что с увеличением скорости нагружения уменьшается время протекания пластической деформации, поэтому ее значение будет зависеть не только от силы удара, т.е. амплитуды ударного импульса, но и от его длительности, что обычно при упрочнении ППД не рассматривалось. Учет данного факта стал возможен с появлением волнового деформационного упрочнения (ВДУ). Особенность способа заключается в генерировании волн деформации ударной системой с промежуточным звеном и сообщении их в очаг деформации с целью упрочнения ответственных поверхностей деталей машин. Эффективность способа обеспечивается за счет более полного использования энергии волны деформации в процессе упрочнения. Это достигается за счет предварительного статического поджатия системы «инструмент-волновод» к обрабатываемой поверхности и последующего динамического нагружения бойком. Статическое поджатие обеспечивает рекуперацию отраженных волн деформации. В результате обработки, глубина упрочненного слоя составляет 6-8 мм, а степень упрочнения достигает 150% [2].

Так как процесс ВДУ разработан достаточно недавно, то большинство исследований проводились исключительно экспериментально. Для всестороннего понимания процесса ВДУ необходимо детально знать, что происходит в ударной системе после удара бойком по статически поджатому волноводу к среде нагружения, как формируется волна деформации, что оказывает влияние на передачу энергии ударного импульса. Решение перечисленных задач возможно только в комплексе, это связано с тем, что рассматриваемы факторы связаны между собой и влияют друг на друга. Оценить степень влияния того или иного фактора на формирование ударного импульса лучше всего визуально.

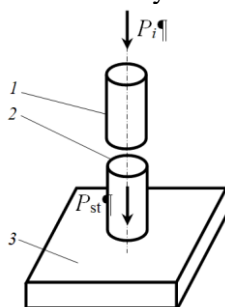


Рис.1. Схема ударной системы: 1 – боек; 2- волновод; 3- среда нагружения (образец)

Целью данной работы является разработка методики моделирования процесса волнового деформационного упрочнения, на основе модели формирования ударного импульса в очаге деформации, с применением средств современного инженерного анализа.

Для визуализации быстротечных ударных процессов (порядка  $10^{-5}$ с), хорошо зарекомендовал себя метод конечных элементов [4,5]. На его принципе основаны современные средства инженерного анализа. Лидером в данной области является программный комплекс Ansys. Разработка методики моделирования, на основе модели ударного импульса в очаге

деформации, в процессе волнового деформационного упрочнения делится на четыре этапа (рис.2). На первом этапе, в разделе Workbench программы Ansys, в графическом модуле создаются элементы модели: боек, волновод и среда нагружения. Затем в модуле Engineering Data создаются модели материалов ударной системы и среды нагружения. На втором этапе в модуле Static Structural задается предварительно статическое поджатие волноводом среды нагружения. На третьем этапе происходит моделирование быстротечной ударной нагрузки в модуле LS-Dyне. На четвертом этапе, в модуле Solution, происходит обработка и визуализация результатов моделирования. Модуль позволяет визуализировать в модели действия различных видов деформаций, напряжений и т.д.

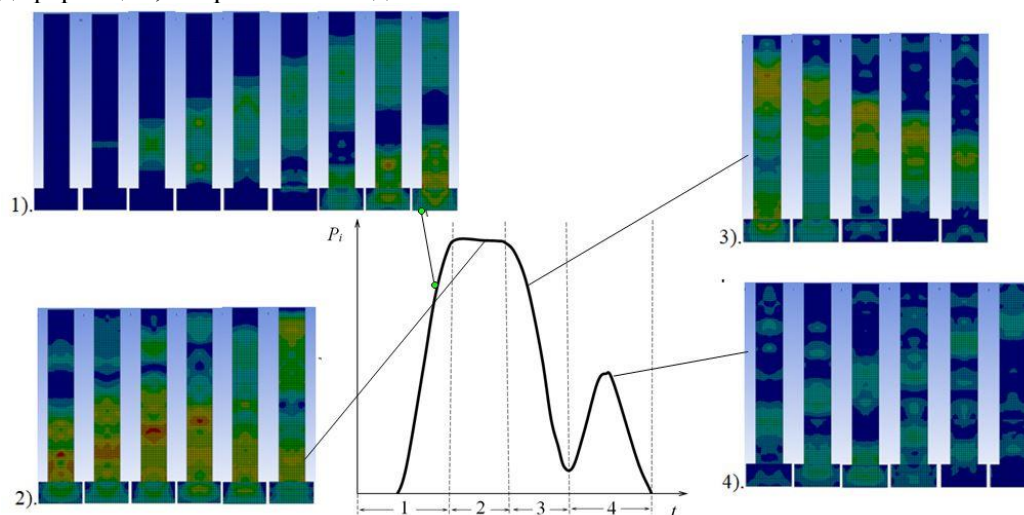


Рис.2. Ударный импульс: 1 – фронт нарастания; 2- период действия ударного импульса; 3- фронт спада; 4 – повторное действие отраженного ударного импульса (хвостовая часть).

Разработанная методика позволила визуально оценить распространение волны деформации в ударной системе и среде нагружения в случае нанесения единичного удара бойком. Визуализация распространения ударного импульса в элементах модели за время равное периоду длительности ударного импульса представлена на рисунке 2.

Заключение.

Разработанная методика визуализации, на основе модели распространения ударного импульса позволит не только выявить особенности его распространения в разных типах ударных систем, но и установить такие их типы, которые позволят более полно передавать в среду нагружения ударную нагрузку. Полученные данные о процессе распределения ударного импульса в элементах ударных систем и среде нагружения, позволят более эффективно выбирать элементы ударных систем под конкретные задачи упрочнения.

### Литература

1. Visualizing the process of forming a shock pulse in the deformation zone / A. V. Kirichek, S. V. Barinov, M. N. Ryzhkova, A. V. Yashin // CEUR Workshop Proceedings, Bryansk, 23–26 сентября 2019 года. – Bryansk: Без издательства, 2019. – P. 265-267.
2. Kirichek A.V., Barinov S.V., Yashin A.V., "Patterns of Wave Deformational Multicontact Half-Subspace Loading", Key Engineering Materials, Vol. 736, pp. 12-17, 2017. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.12
3. Kirichek A.V., Barinov S.V., Aborkin A.V., Yashin A.V., Zaicev A.A. Strengthening of the surface layer of the material by wave deformation multi-contact loading, Materials Science and Engineering, 2017
4. Strang G. and Fix G. J., "An Analysis of the Finite Element Method," Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1973.
5. Mechanics of plastic deformation in metal processing / Erich Gottfried Thomsen, Charles T. Yang, Shiro Kobayashi. – 1965. – 486 p.

Баринов С.В., Никитина Л.Г.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
armitp@yandex.ru*

### **Моделирование процесса обработки сварных швов волной деформации.**

В современном мире цифровые технологии рассматриваются как средство описания полного цикла жизни изделия – от проектирования и изготовления, до эксплуатации и утилизации. Научно-техническим отраслям промышленности поставлена грандиозная задача еще до запуска изделия и составляющих ее деталей в производство, создать, изготовить и испытать в условиях эксплуатации математические модели. Наименее проработанными с позиции моделирования являются технологические процессы изготовления деталей. Проблемы их моделирования во многом связаны не только с большим количеством технологических факторов, но и с изменением формы и размеров детали в процессе обработки, непрерывно и динамически меняющимся напряженно-деформированным состоянием изделия, необходимостью учета тепловых процессов. Немалую сложность представляет и решение проблемы передачи информации об изделии при переходе от одной операции к другой. Так как для моделирования разных операций разработаны и предлагаются разные программные средства, на этапе межоперационного перехода неизбежна потеря части информации. Проблема стоит особенно остро для передачи информации между технологическими процессами, отличающимися по физическому характеру воздействий на материал исходной заготовки.

Целью работы является получение единой конечно-элементной модели комплексного процесса, позволяющей получить визуальную информацию о влиянии параметров процесса сварки на результаты процесса волнового деформационного упрочнения (ВДУ) материала сварного шва.

Моделирование взаимосвязанных последовательно выполняющихся технологических процессов разной физической природы – сварки и упрочнения, позволяют получить более общую и объективную визуальную информацию о процессе в целом. Известные конечно-элементные модели процесса сварки не предполагают моделирование последующих воздействий на сварной шов [1,5,6]. Известные средства современного инженерного анализа в большинстве случаев не специализируются на моделировании быстротекущих ударных процессов (длительностью  $10^{-7} \dots 10^{-5}$  секунды), что характерно для ВДУ.

Суть ВДУ [2] заключается в волновом нагружении обрабатываемого материала ударными импульсами с заданной скважностью, энергией и длительностью. ВДУ обладает возможностями повышения микротвердости и формирования сжимающих остаточных напряжений на глубине более 10 мм. Это делает использование метода перспективным для повышения прочности сварных швов. Известна апробированная на сплошном материале конечно-элементная модель ударной системы с промежуточным звеном (волноводом). Она позволяет исследовать закономерности влияния параметров элементов ударной системы и материала среды нагружения на эффективность передачи энергии ударного импульса [3,4], однако не позволяет использовать в качестве исходной информации результаты моделирования процесса сварки.

Моделирование в программном комплексе Ansys выполняется поэтапно, при этом выходные данные более раннего этапа моделирования выступают в качестве исходных данных последующего этапа. Выбор Ansys обоснован высокой достоверностью получаемых данных и широким набором мультидисциплинарных расчетных модулей, объединенных на одной платформе. Разработка конечно-элементной модели процесса обработки сварных швов волной деформации состояла из двух этапов. На первом этапе, с использованием ранее полученных данных, создавалась конечно-элементная модель сварного шва. Второй этап, представлял собой

объединение данных, полученных в результате моделирования сварного шва с моделью упрочнения волной деформации в единую конечно-элементную модель процесса обработки сварных швов волной деформации.

В качестве примера использования разработанной методики создавалась единая конечно-элементная модель процесса обработки сварных швов волной деформации. Так сварное изделие состояло из двух стальных пластин марки 40Х с размерами 150\*70\*10 мм (рис.1). Сварка выполнялась за два прохода, полуавтоматом, с силой тока корневого и лицевого шва, соответственно, 185 и 130А. Наплавляемый материал - сталь марки 40Х. Разделка кромок сварных заготовок по ГОСТ 5264-80. Режимы ВДУ: энергия ударов 70 Дж; коэффициент перекрытия  $K=0,3$ ; инструмент стержневой ролик длиной 40 мм и диаметром 10 мм. В качестве примера смоделировано семь ударов инструмента по поверхности сварной заготовки. Адекватность полученных данных в результате моделирования устанавливалась на основании их сравнения с экспериментальными данными, полученными при аналогичных условиях. В модели сварной заготовки сравнивалась карта распределения микротвердости в поверхностном слое до и после ВДУ, оценивались размеры единичных отпечатков и распределение карты твердости под ними. Полученные в результате моделирования значения соответствуют результатам эксперимента с уровнем доверительной вероятности 0,95.

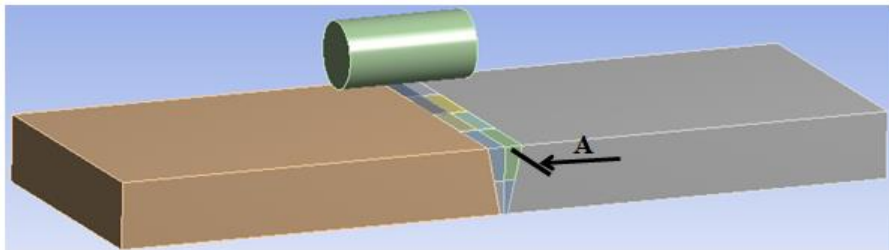


Рис.1. Схема модели.

На рисунках 2 и 3 представлено распределение остаточных напряжений в сварных швах до и после ВДУ. Полученные данные говорят о снижении величин растягивающих напряжений (данные со знаком «плюс») и переходе их в сжимающие (данные со знаком «минус»), в среднем, по глубине на 8 мм.

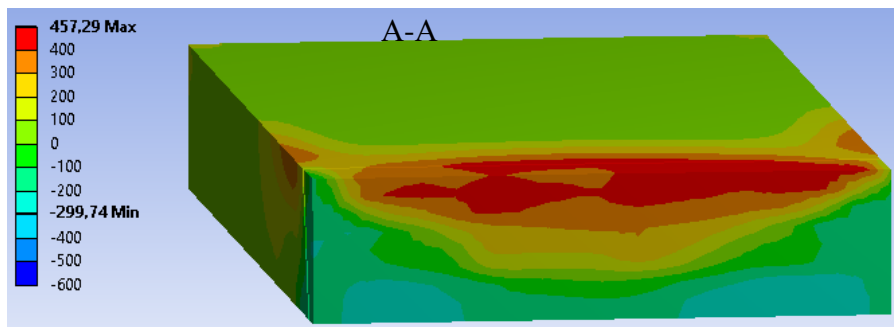


Рис.2. Распределение остаточных напряжений в образце после сварки

Подводя итоги выполненной работы, необходимо отметить, что:

- на первом этапе решается задача моделирования процесса формирования сварного шва с возможностью расчета температурных полей, полей напряжений и деформаций в процессе нагрева и охлаждения сварной заготовки;
- на втором этапе расчетные данные импортируются в конечно-элементную модель обработки сварных швов волной деформации;
- единая конечно-элементная модель позволяет строить карты микротвердости по выбранным

(опасным) сечениям и визуально отслеживать изменение напряжений и деформаций в сварных заготовках в зависимости от технологических режимов упрочнения волной деформации.

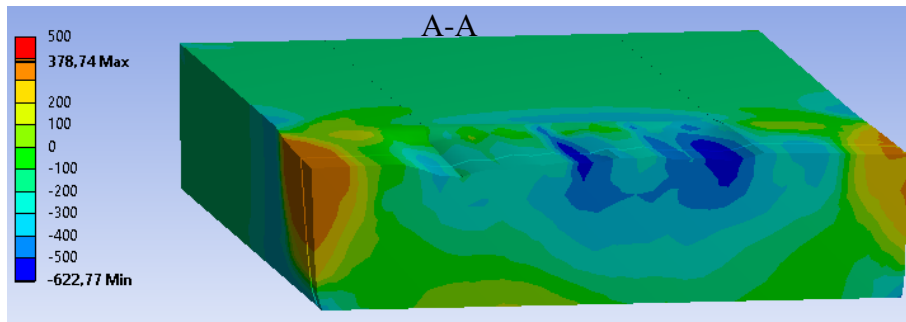


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в сварном образце после ВДУ

Полученная визуальная информация позволяет выполнять качественную и количественную оценку результата комплексного процесса, что способствует повышению несущей способности и работоспособности изделия в целом.

### Литература

1. Kirichek, A. Visualization of the process of processing welds by a deformation wave / A. Kirichek, S. Barinov, A. Yashin // CEUR Workshop Proceedings : 30, Saint Petersburg, 22–25 сентября 2020 года. – Saint Petersburg, 2020. Vol. 2744.
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием (2004)
3. Kirichek A.V., Barinov S.V., Ryzhkova M.N., Yashin A.V. Visualizing the process of forming a shock pulse in the deformation zone // CEUR Workshop Proceedings, vol. 2485, pp. 265-267. (2019)
4. Kirichek, A.V., Barinov, S.V., Yashin, A.V., Konstantinov, A.M. Study of the influence of cross section sizes of the rod shock system on the efficiency of shock pulse energy transfer to the deformation center // Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1479 (2020) 012067 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1479/1/012067
5. Пронин А.И. Развитие методов оценки работоспособности кольцевых сварных швов газопроводов компрессорных станций: диссертация кандидата технических наук: 25.00.19. (2009)
6. Porowski J.S., O'Donnell W.J., et al. Use of the mechanical stress improvement process to mitigate stress corrosion cracking in BWR piping system. Nuclear Engineering and Design, vol. 124, p. 91-100 (1990)

Бегова А.В.

*Новомосковский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»  
301650, Тульская область, г. Новомосковск, ул. Дружбы, 8  
E-mail: begova\_69@mail.ru*

### **Исследование характеристик пластичности стали при деформации шариковым индентором**

Функциональность конструкционного материала детали характеризуется так называемыми эксплуатационными или служебными свойствами, набор которых для материала определяется условиями нагружения детали при эксплуатации оборудования.

Обобщенно, нагружение конструкционного материала можно свести к четырем компонентам: механическому, трибологическому, термическому и химическому. В настоящее время инженерные расчетные методики разработаны не для всех видов нагружения материалов, поскольку для случаев комплексного нагружения, когда значимым являются несколько компонентов, отсутствуют методики определения эксплуатационных свойств.

Как видно видов нагружения много, а механических свойств недостаточно. Поэтому для обоснованного выбора материалов необходима дополнительная информация о свойствах.

Поэтому целью эксперимента являлось разработка методики оценки пластичности стали в условиях объемного нагружения. Объемное нагружение осуществлялось внедрением шарикового индентора на твердомере Бринелля ТШ-2М [1].

Пластичность – это способность материала без разрушения изменять свои размеры и форму под воздействием внешней нагрузки и сохранять эти изменения после прекращения ее действия.

Одной из характеристик пластичности является относительное удлинение  $\delta$  при испытании металла на разрыв. В справочной литературе информация по пластичности приводится на основании результатов испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84 «Методы испытаний на растяжение». Однако, в ряде случаев разрушение материала происходит в условиях, отличных от условий нагружения разрывного образца. К таким видам нагружения относятся, например, нагружение трущихся деталей машин, в частности: трение штока поршня о сальниковую набивку и т.д.

Представляло интерес исследование пластичности в условиях объемного напряженного состояния. В нашем случае объемное напряженное состояние реализовывалось в условиях нагружения шариковым индентором на твердомере Бринелля ТШ-2М.

Объектом исследования являлись металлические цилиндры из стали 40Х. Для подготовки к проведению эксперимента металлические цилиндры были расточены на токарном станке.

После механической обработки образцов их подвергли термической обработке: закалке с последующим отпуском, отжигом. Термообработка проводилась в муфельных печах. Для получения большего диапазона значений три образца были подвергнуты закалке при температуре 850°С и последующего отпуска при температуре 550°С, другие три образца были подвергнуты закалке при температуре 850°С и последующего отпуска при температуре 300°С, и два образца были подвергнуты отжигу при температуре 850°С. После термической обработки образцы были зачищены от нагара и отшлифованы.

После того, как образцы были полностью готовы, на них была приложена нагрузка шариковым индентором диаметром 10 мм на твердомере ТШ-2М. В результате на поверхности цилиндрических шайб образовывались лунки (рис.1.а) и были пересчитаны значения твердости поверхностного слоя по отпечаткам индентора.

В программе Excel были посчитаны значения длины дуги лунки, относительного удлинения и наклепа.

При этом на каждом образце использовалась разная нагрузка для получения разной степени деформации: 500, 1000, 1500, 2000, 3000 (кгс). Отпечатки были сделаны таким образом, чтобы наплывы после нагрузки не заходили на другие отпечатки. Далее по методу Роквелла была

измерена твердость материала в лунках, образовавшихся после измерения твердости по методу Бринелля (рис.1.б) [2].

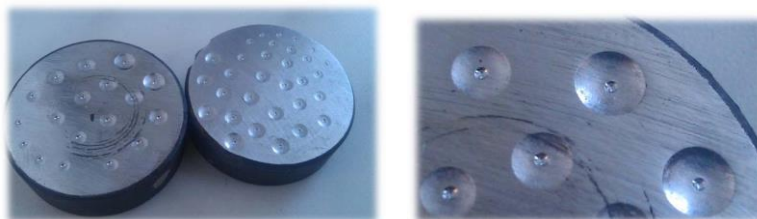
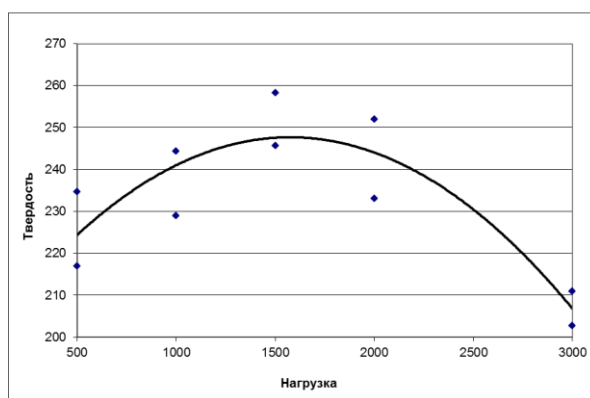
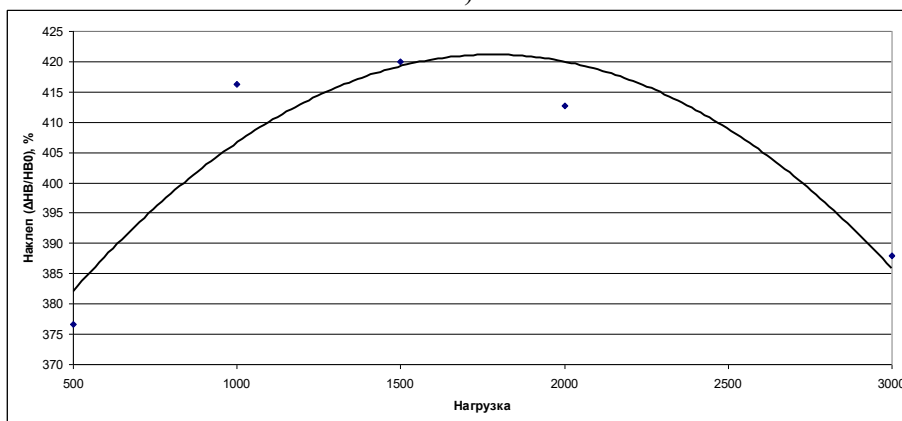


Рис 1. Экспериментальные образцы: а – после испытания по методу Бринелля, б – после испытания по методу Роквелла

Данные эксперимента были занесены в соответствующие таблицы и построены зависимости изменения твердости НВ и наклепа металла образцов в зависимости от нагрузки на индентор (рис.2).



а)



б)

Рис.2. Зависимость твердости НВ (а) и наклепа (б) металла образцов в зависимости от нагрузки на индентор

Исходя из анализа графиков, можно сделать следующие выводы. Относительная деформация поверхности для всех видов термообработки растет в зависимости от нагрузки, достигает определенного максимума и плавно снижается. Максимум наблюдается в диапазоне нагрузок от 1500 до 2000 кгс.

Характер изменения наклепа в зависимости от нагрузки имеет такую же тенденцию.

### Литература

1. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.
2. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу.

Борисова Е.А., Зелинский В.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: apmitr@yandex.ru*

### **Влияние обработки слабым магнитным полем на структурную неоднородность легированных сталей**

Перспективным физическим методом повышения долговечности подающих роликов, являющихся основными деталями механизма подачи пружинонавивочных автоматов, обеспечивающих подачу пружинной проволоки в зону навивки пружин является обработка относительно слабым магнитным полем (ОМП). Однако природа влияния намагничивания на повышение долговечности роликов по износу до сих пор практически не изучена и управление этим эффектом не представляется возможным. Поэтому установление механизма и возможностей кратного снижения износа магнитной обработкой на примере контактных пар, содержащих элементы из легированной стали представляет собой важную задачу.

Контактную пару «легированная сталь – углеродистая сталь» образуют подающие ролики механизма подачи пружинонавивочных автоматов, исполнительные органы металлорежущих станков в контакте с обрабатываемым материалом, исполнительные органы в виде роликовых захватов, направляющих роликов в зонах скользящего контакта с рельсом железнодорожных путевых машин, системы формообразующий ролик – деформируемый материал в оборудовании для холодного проката, в разнообразных профилирующих машинах и др. Общим для всех перечисленных контактных пар является скольжение поверхностей в условиях пластического деформирования, которое сопровождается повышенным изнашиванием при схватывании. Данный вид изнашивания происходит в результате схватывания на микроучастках сопряженных поверхностей с последующим вырывом или срезом материала, переносом его с одной поверхности на другую. Существующие на сегодняшний день мероприятия по повышению долговечности таких контактных пар, основанные на термической и химико-термической обработке, направленные на повышение прочности контактной поверхности, в значительной мере уже исчерпаны. Альтернативным методом повышения долговечности контактных пар «легированная сталь - углеродистая сталь» может быть метод обработки слабым магнитным полем относительно невысокой напряженности (до 500 кА/м). Намагничивание в относительно слабом поле имеет ряд достоинств, таких как простота конструкции; незначительная стоимость и высокая производительность устройств, относительная простота технологии, а также сохранение геометрии обработанных деталей. Резервом повышения долговечности по износу контактных пар с процессами схватывания является создание на их контактных площадках в пределах нескольких наружных атомных слоев кристаллической решетки особого энергетического состояния, инициирующего снижение износа.

Локальное схватывание кристаллических решеток материалов контактных пар «легированная сталь – углеродистая сталь» определяется уровнем энергии связи между атомами в решетках [1, 2], на которую в свою очередь влияет наличие вакансий, искажений от примесей, включений легирующих элементов и др. [3, 4]. После ОМП уменьшается их количество в решетке, благодаря чему повышается энергия связи между атомами в доменных стенках. Следовательно, наличие дефектов влияет на структурную неоднородность легированных сталей и, тем самым, энергию взаимосвязи атомов. Оценка неоднородности конструкционных материалов через параметры статистического распределения значений микротвердости используется в работе [5].

Оценку влияния обработки слабым магнитным полем на структурную неоднородность проводили при помощи микротвердомера ПМТ-3М путем измерения микротвердости незакаленных образцов из сталей ХВГ и 40Х до и после проведения ОМП. В результате проведенных экспериментов установлено:



1 повышение микротвердости на 5,5% для стали ХВГ и 4,3% для стали 40Х не может заметно повысить механическую прочность контактной поверхности и тем самым повлиять на ее долговечность по критерию износостойкости, что также отмечается авторами работ [6, 7];

2 поле разброса значений микротвердости в результате проведения обработки магнитным полем значительно уменьшилось в 1,81раза для стали ХВГ и в 1,78раза для стали 40Х.

Таким образом, обработка слабым магнитным полем оказывает существенное влияние не на механическую прочность контактной поверхности легированной стали, а на ее адгезионные свойства, создавая препятствия атомам легирующих элементов в участии в химическом взаимодействии с сопряженной решеткой контактирующей поверхности.

### Литература

1. Зелинский В.В., Борисова Е.А. Опытная оценка влияния магнитной обработки на износостойкость инструментальных сталей // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*, - 2013. - № 3, - С.55-60.
2. Зелинский В.В., Степанов Ю.С., Борисова Е.А. Влияние обработки магнитным полем на износ инструментальных сталей // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, № 2 (322), 2017, с. 73-81.
3. Гуляев А.П. *Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп.* М.: Металлургия, 1986. - 544 с.
4. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов.* – М.: Металлургия. 1983.- 359 с.
5. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин (часть 2). Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование/ *Вестник научно-технического развития*. №1 (77), 2014., с.37-55.
6. Колеров О.К., Трухов А.П., Логвинов А.Н., Мокеев А.В. К магнито-импульсной обработке быстрорежущих сталей / *Вестник СГАУ*, 2004, № 1(5), с. 85-88.
7. Гаркунов Д.Н., Суранов Г.И., Коптяева Г.Б. О природе повышения износостойкости деталей и инструмента магнитной обработкой. - *Трение и износ*, 1982, т. 3, № 2, с. 327-330.

Борисова Е.А., Зелинский В.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: apmitr@yandex.ru*

### **Влияние обработки слабым магнитным полем на структурную неоднородность легированных сталей**

Перспективным физическим методом повышения долговечности подающих роликов, являющихся основными деталями механизма подачи пружинонавивочных автоматов, обеспечивающих подачу пружинной проволоки в зону навивки пружин является обработка относительно слабым магнитным полем (ОМП). Однако природа влияния намагничивания на повышение долговечности роликов по износу до сих пор практически не изучена и управление этим эффектом не представляется возможным. Поэтому установление механизма и возможностей кратного снижения износа магнитной обработкой на примере контактных пар, содержащих элементы из легированной стали представляет собой важную задачу.

Контактную пару «легированная сталь – углеродистая сталь» образуют подающие ролики механизма подачи пружинонавивочных автоматов, исполнительные органы металлорежущих станков в контакте с обрабатываемым материалом, исполнительные органы в виде роликовых захватов, направляющих роликов в зонах скользящего контакта с рельсом железнодорожных путевых машин, системы формообразующий ролик – деформируемый материал в оборудовании для холодного проката, в разнообразных профилирующих машинах и др. Общим для всех перечисленных контактных пар является скольжение поверхностей в условиях пластического деформирования, которое сопровождается повышенным изнашиванием при схватывании. Данный вид изнашивания происходит в результате схватывания на микроучастках сопряженных поверхностей с последующим вырывом или срезом материала, переносом его с одной поверхности на другую. Существующие на сегодняшний день мероприятия по повышению долговечности таких контактных пар, основанные на термической и химико-термической обработке, направленные на повышение прочности контактной поверхности, в значительной мере уже исчерпаны. Альтернативным методом повышения долговечности контактных пар «легированная сталь - углеродистая сталь» может быть метод обработки слабым магнитным полем относительно невысокой напряженности (до 500 кА/м). Намагничивание в относительно слабом поле имеет ряд достоинств, таких как простота конструкции; незначительная стоимость и высокая производительность устройств, относительная простота технологии, а также сохранение геометрии обработанных деталей. Резервом повышения долговечности по износу контактных пар с процессами схватывания является создание на их контактных площадках в пределах нескольких наружных атомных слоев кристаллической решетки особого энергетического состояния, инициирующего снижение износа.

Локальное схватывание кристаллических решеток материалов контактных пар «легированная сталь – углеродистая сталь» определяется уровнем энергии связи между атомами в решетках [1, 2], на которую в свою очередь влияет наличие вакансий, искажений от примесей, включений легирующих элементов и др. [3, 4]. После ОМП уменьшается их количество в решетке, благодаря чему повышается энергия связи между атомами в доменных стенках. Следовательно, наличие дефектов влияет на структурную неоднородность легированных сталей и, тем самым, энергию взаимосвязи атомов. Оценка неоднородности конструкционных материалов через параметры статистического распределения значений микротвердости используется в работе [5].

Оценку влияния обработки слабым магнитным полем на структурную неоднородность проводили при помощи микротвердомера ПМТ-3М путем измерения микротвердости незакаленных образцов из сталей ХВГ и 40Х до и после проведения ОМП. В результате проведенных экспериментов установлено:

1 повышение микротвердости на 5,5% для стали ХВГ и 4,3% для стали 40Х не может заметно повысить механическую прочность контактной поверхности и тем самым повлиять на ее долговечность по критерию износостойкости, что также отмечается авторами работ [6, 7];

2 поле разброса значений микротвердости в результате проведения обработки магнитным полем значительно уменьшилось в 1,81раза для стали ХВГ и в 1,78раза для стали 40Х.

Таким образом, обработка слабым магнитным полем оказывает существенное влияние не на механическую прочность контактной поверхности легированной стали, а на ее адгезионные свойства, создавая препятствия атомам легирующих элементов в участии в химическом взаимодействии с сопряженной решеткой контактирующей поверхности.

### Литература

1. Зелинский В.В., Борисова Е.А. Опытная оценка влияния магнитной обработки на износостойкость инструментальных сталей // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*, - 2013. - № 3, - С.55-60.

2. Зелинский В.В., Степанов Ю.С., Борисова Е.А. Влияние обработки магнитным полем на износ инструментальных сталей // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, № 2 (322), 2017, с. 73-81.

3. Гуляев А.П. *Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп.* М.: Металлургия, 1986. - 544 с.

4. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов.* – М.: Металлургия. 1983.- 359 с.

5. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин (часть 2). Структурная и деформационная неоднородность конструкционных материалов и рассредоточенное трещинообразование/ *Вестник научно-технического развития*. №1 (77), 2014., с.37-55.

6. Колеров О.К., Трухов А.П., Логвинов А.Н., Мокеев А.В. К магнито-импульсной обработке быстрорежущих сталей / *Вестник СГАУ*, 2004, № 1(5), с. 85-88.

7. Гаркунов Д.Н., Суранов Г.И., Коптяева Г.Б. О природе повышения износостойкости деталей и инструмента магнитной обработкой. - *Трение и износ*, 1982, т. 3, № 2, с. 327-330.

Волченков А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
armitr@yandex.ru*

### **Исследование влияния на износостойкость модифицированного слоя антифрикционного слоя подшипника скольжения**

Антифрикционные алюминиевые сплавы должны иметь высокую износостойкость для возможности применения в подшипниках. Износ подшипников двигателя — это удаление материала подшипника с его поверхности, вызванное трением скольжения между подшипником и коленчатым валом. Материалы, используемые для подшипников, особенно алюминиевые сплавы, требуют лучшего процесса подготовки поверхности, такого как покрытие или поверхностное упрочнение. Золь-гель процесс представляет собой химический метод, широко используемый в производстве нано-материалов, керамики и пр., основанный на изготовлении материалов из химического раствора.

Существует несколько методов нанесения пленок на поверхность антифрикционного материала. Физическое осаждение из паровой фазы (PVD) — метод осаждения тонких пленок путем конденсации испарившегося материала на различные поверхности. Метод нанесения покрытия включает физические процессы, такие как высокотемпературное вакуумное испарение или бомбардировка плазменным напылением. Химическое осаждение из паровой фазы (CVD) — это химический процесс, используемый для производства твердых материалов высокой чистоты и высоких характеристик. Этот процесс часто используется в полупроводниковой промышленности для производства тонких пленок. В типичном процессе CVD подложка пластины подвергается воздействию одного или нескольких летучих химических элементов, которые вступают в реакцию и/или разлагаются на поверхности подложки с образованием желаемого осадка.

Модификация поверхности является важным методом повышения износостойкости материалов из алюминиевых сплавов. Настоящее исследование проводится в направлении исследования влияния обработки CVD, PVD и последующей золь-гелевой обработки нитридом хрома CrN на микроструктуру, твердость и износостойкость алюминиевых сплавов АК16М4МгН.

Исследование на границе раздела слой/основной материал образцов с поверхностной обработкой, в частности с золь-гелевой обработкой CrN, показывает, что количество CrN, диффундировавшего в поверхностные слои, велико в образцах, обработанных золь-гелем CrN, по сравнению с двумя другими поверхностными слоями. Основной причиной этого являются высокие сжимающие напряжения, вызывающие расширение кристаллической решетки. В образцах с CVD-покрытием CrN отмечается увеличение твердости.

Максимальная твердость около 150 HV 0,01 наблюдается у образцов с покрытием CrN CVD из-за присутствия твердых нитридов в больших количествах. Максимальная твердость 155 HV 0,01 наблюдается у образцов с покрытием PVD из-за образования смеси нитридов в умеренных количествах. Установлено, что износостойкость образцов с обработанной поверхностью выше, чем у необработанных образцов. Установлено, что потери на износ увеличиваются по мере увеличения длины трения и прикладываемых нагрузок. Удельный износ также увеличивается с увеличением расстояния скольжения и приложенных нагрузок. Совместное действие сильной адгезии, истирания и сильной пластической деформации является основной причиной постоянной потери материала в необработанных золь-гелем образцах. В то время как износ образца, обработанного золь-гелем в мягкой форме, характеризуется преобладанием микроабразивного изнашивания. Благодаря оптимальным параметрам золь-гель обработки процессы с покрытием нитридом хрома CVD и PVD повышают износостойкость без значительного ухудшения твердости поверхности.

Каменский М.Н.

Новомосковский институт РХТУ имени Д.И. Менделеева  
301665, Тульская область, г. Новомосковск, ул. Дружбы, 8  
MKamensky@yandex.ru

### Исследование нагруженности зубчато-реечных механизмов

Анализ современных конструкций машин для бестраншейной прокладки труб показывает, что повышение эффективности их применения в значительной степени зависит от системы подачи исполнительного органа при обеспечении требуемого усилия. Применяемые в настоящее время цепные и гидравлические системы имеют ряд недостатков: различное усилие подачи при проколе скважины и обратном ее расширении, возможность травмирования обслуживающего персонала при разрыве цепи, значительные габариты вспомогательного оборудования.

Необходимость обеспечения конкурентоспособности разрабатываемых установок предполагает устранение указанных недостатков. Применение зубчато-реечных механизмов подачи, позволит устранить указанные отрицательные характеристики. Такое решение обусловлено необходимым усилием подачи – 400...500 кН, успешным опытом применения бесцепных систем подачи, а также повышенной надёжностью зубчатых передач, их неприхотливостью в обслуживании, а также возможностью ликвидации вспомогательного оборудования, имеющего значительные габариты.

Однако необходимость обеспечения минимальных габаритов конструкции и малая дистанция перемещения предопределяет необходимость проведения исследований по определению рациональных параметров системы перемещения. Так тяговый орган может быть выполнен в двух вариантах – цевочная либо зубчатая рейка. С использованием программы АРМ Winmachine была построена конструкция зубчатой рейки (рис. 1) и для проведения ее прочностных исследований разработана твердотельная модель с использованием метода конечных элементов. Проведенный предварительный анализ напряжённо-деформированного состояния зубчатой рейки показал, что при толщине рейки 60 мм и высоте зуба 40 мм напряжения находятся в допустимых пределах.

Проведённый анализ прочностных характеристик цевочных реек (рис. 2) при помощи системы АРМ Winmachine позволил определить наиболее целесообразные места и способы закрепления реек с точки зрения теории устойчивости.

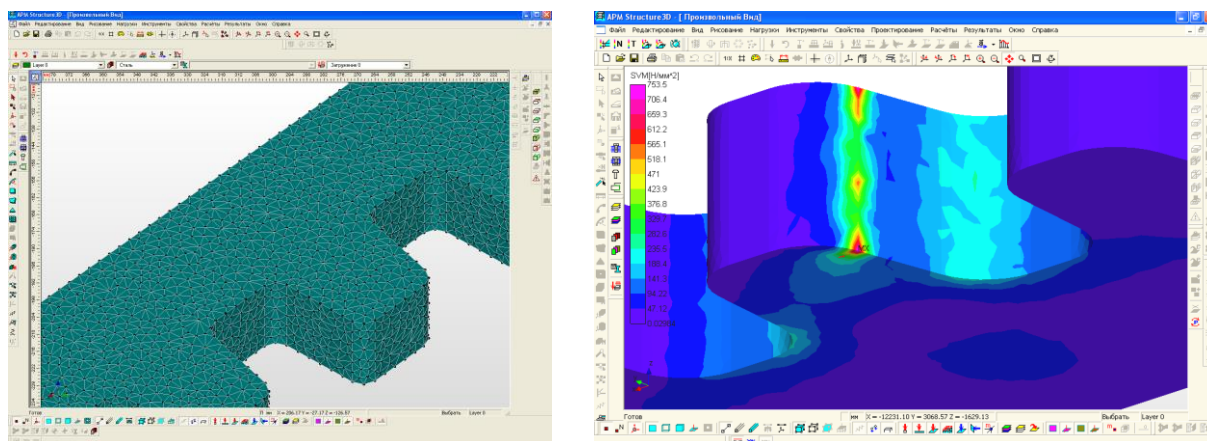


Рис. 1. Твердотельная модель и эквивалентные напряжения в зубчатой рейке

Анализ нагруженности цевочной рейки позволил определить необходимый и достаточный диаметр цевки (30 мм при коэффициенте запаса 1,4).

Расчётная зависимость для определения коэффициента запаса устойчивости системы имеет вид:

$$n_y = \frac{\pi^2 EJ_{\min}}{(\mu l)^2 P} \geq [n_y],$$

где  $E$  – модуль упругости первого рода;

$J_{\min}$  – минимальный момент инерции исследуемой системы;

$l$  – длина исследуемой системы;

$\mu$  – коэффициент приведения длины;

$F$  – приложенная нагрузка.

Для цевочной рейки был проведен анализ перемещений в ее элементах (рис. 3), при шаге зацепления 50 мм, в зависимости от места приложения нагрузки (с учётом веса машины, приходящегося на рейку). Это позволяет сделать вывод о том, что при движении зубчатого колеса по рейке могут возникнуть перемещения в её элементах, причём эта зависимость не постоянна и определяется расстоянием точки контакта колеса с цевкой рейки от различного конструктивного расположения опор.

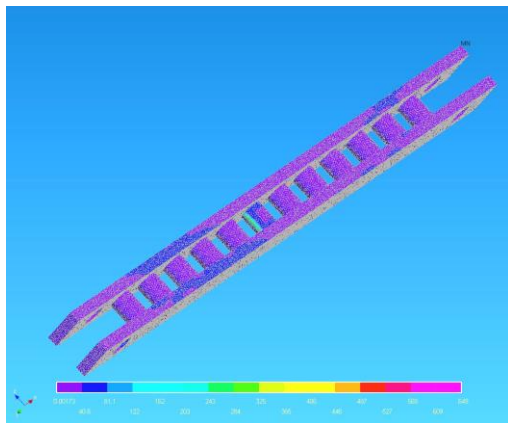


Рис. 2. Эквивалентные напряжения в цевочной рейке

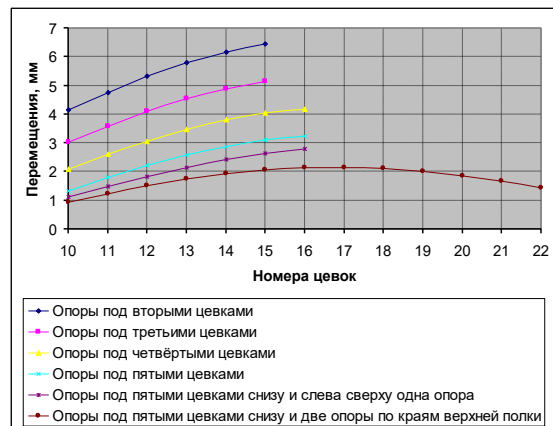


Рис. 3. Зависимость перемещения от места приложения нагрузки

Таким образом, при проектировании тяговых органов реечных систем перемещения машин для бестраншейной прокладки труб необходимо разгружать рейки от восприятия веса машины, вводя дополнительные направляющие.

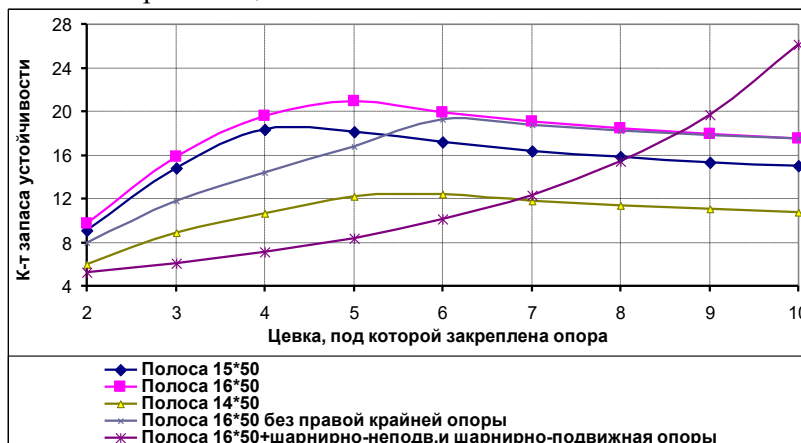


Рис. 4. Зависимость коэффициента запаса устойчивости от положения опор рейки

Анализ рисунка 4 показывает, что наиболее предпочтительным является установка шарнирно подвижных опор под пятыми цевками с краёв при фиксации верхней полки рейки посредством шарнирно неподвижных опор. При этом коэффициент запаса устойчивости возрастает в 1,7 раза при увеличении толщины борта рейки с 14 до 16 мм, соответственно снижается вероятность возникновения простоев из-за отказа оборудования.

Карпов А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»*  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
krash75@mail.ru

### **О количественной оценке показателя удельной энергоёмкости изделия, технологического процесса и его элементов**

Разрабатывая методику оптимизации технологических процессов по критерию наибольшей энергетической эффективности [1], возникает вопрос: какой именно физический показатель принять в качестве рассматриваемого критерия.

Очевидно, выбор такого показателя предопределяет алгоритм параметрической оптимизации и вытекающую из него инженерную методику расчёта оптимальных технологических режимов обработки. Ранее было показано, что главными требованиями при выборе критерия оптимизации должны служить, в частности, простота определения, зависимость его от основных параметров оптимизируемого процесса, однозначность количественного определения и т.д. [2]. Установлено, что физической величиной, отвечающей этим требованиям, может служить энергоёмкость (удельная энергоёмкость) процесса. В литературных источниках и обзорах, касающихся показателя энергоёмкости, выявлена значительная вариативность к её трактовке и количественному определению на различных уровнях иерархии производственного и технологического процесса изготовления изделия.

Во-первых, как один из показателей технологичности конструкции изделия, общая удельная энергоёмкость изделия  $\mathcal{E}_{уд}$  включает две составляющие: производственную ( $\mathcal{E}_{пр.уд}$ ) и эксплуатационную ( $\mathcal{E}_{экс.уд}$ ).

Удельная производственная энергоёмкость изделия рассчитывается как отношение:

$$\mathcal{E}_{пр.уд} = \frac{\mathcal{E}_{пр}}{P \cdot \tau}, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_{пр}$  – суммарный расход ресурсов (топлива, энергии) на изготовление единицы изделия;

$P$  – полезный эффект от эксплуатации изделия, определяемый по результатам научных исследований для конкретного вида изделия;  $\tau$  – предполагаемый срок службы изделия.

Удельная эксплуатационная энергоёмкость изделия определяется по формуле

$$\mathcal{E}_{экс.уд} = \frac{\mathcal{E}_{экс}}{P \cdot \tau}, \quad (2)$$

где  $\mathcal{E}_{экс}$  – расход топлива или энергии на эксплуатацию изделия за полный срок его службы.

Общая удельная энергоёмкость изделия  $\mathcal{E}_{уд}$  равна их сумме:

$$\mathcal{E}_{уд} = \mathcal{E}_{пр.уд} + \mathcal{E}_{экс.уд}. \quad (3)$$

Очевидно, входящие формулы 1-3 параметры являются глобальными, зависят от множества частных параметров и являются трудноопределимыми в условиях реализации конкретных технологических процессов и их элементов – технологических операций, технологических переходов, рабочих ходов.

В качестве меры энергозатрат на процесс обработки резанием Г.И. Грановский предложил величину  $\mathcal{E}$ , кВт·ч/кг, равную отношению энергии, затраченной в течение 1 часа непрерывной работы режущего инструмента к массе, снятой за это время стружки  $m_ч$ , кг:

$$\mathcal{E} = \frac{1,67 \cdot 10^{-2} \cdot F_t \cdot v_c}{m_ч}, \quad (4)$$

где  $F_t$  – величина тангенциальной составляющей силы резания,

$N$ ;  $v_c$  – величина скорости резания, м/мин.

Отметим, что числитель формулы 4 представляет собой эффективную мощность резания  $N$ , кВт, а знаменатель (массу снятой стружки) можно понимать как результат обработки.

В.К. Старков, рассматривая процесс стружкообразования с позиций дислокационно-энергетической теории, предложил отдельную трактовку показателя удельной энергоёмкости для черновой (предварительной)  $\eta_1$  и чистовой (окончательной)  $\eta_2$  обработки:

$$\eta_1 = \frac{U}{v_c \cdot f_n \cdot a_p}, \quad (5)$$

где  $U$  – общие затраты энергии стружкообразования;  
 $f_n$  – величина подачи;  
 $a_p$  – величина глубины резания;

$$\eta_2 = \frac{U_c}{v_c \cdot f_n}, \quad (6)$$

где  $U_c$  – скрытая энергия деформации поверхностного слоя детали после резания.

Входящие в эти зависимости энергетические параметры  $U$  и  $U_c$  также являются трудноопределимыми в конкретных технологических условиях: они зависят, например, от параметров кристаллической решётки, плотности распределения дислокаций в материале и т.п.

Удельная энергоёмкость резания  $e$  следует рассматривать как работу режущего инструмента по образованию единичного объёма стружки. Величина  $e$ , помимо вида и свойств обрабатываемого материала, зависит от конкретных условий осуществления рабочего хода: параметров инструмента (типоразмер, материал, геометрия режущей части, число зубьев и т.д.), элементов режима резания (глубина резания, подача, скорость резания), типа СОТС (при наличии) и других, которые все вместе и составляют систему управляемых (оптимизируемых) технологических параметров.

Достоинством показателя  $e$  являются её устойчивые функциональные связи с вышеуказанными параметрами, выбор, назначение или расчёт которых есть актуальная задача технологической подготовки производства изделий с использованием операций механической обработки.

С учётом того, что в течение времени рабочего хода мощность резания  $N$  может либо оставаться условно постоянной ( $N = \text{const}$ ), либо меняться (однократно или циклически) по определённой закономерности  $N = N(T)$ , нами предложено обобщённое выражение удельной энергоёмкости процесса резания в следующем виде [3]:

$$e = \frac{A_{\text{рез}}}{V} = \frac{n_{\text{ц}} \cdot A_{\text{ц}}}{V} = \frac{n_{\text{ц}} \cdot \int_0^{T_{\text{ц}}} N(T) dT}{V} = \frac{n_{\text{ц}} \cdot k_N \cdot N_{\text{max}} \cdot T_{\text{ц}}}{V} = \frac{k_N \cdot N_{\text{max}}}{\Pi}, \quad (7)$$

где  $A_{\text{рез}}$  – работа резания;

$V$  – объём стружки;

$n_{\text{ц}}$  – количество циклов изменения мощности за время резания;

$T_{\text{ц}}$  – продолжительность одного полного цикла изменения мощности;

$k_N$  – коэффициент аппроксимации (приближения) реального графика изменения мощности  $N = N(T)$  к одному из типовых, наиболее часто встречающихся графиков, содержащих ординату  $N_{\text{max}}$  (максимальное значение мощности за цикл её изменения);

$\Pi$  – производительность стружкообразования (съём материала в единицу времени).

### Литература

1. Карпов А.В. Модель параметрической оптимизации операций обработки резанием по критерию наибольшей энергетической эффективности // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 6-1. – С. 50-55; URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=38070> (дата обращения: 30.12.2022).

2. Карпов А.В. Совершенствование технологических процессов обработки резанием с использованием энергетического критерия эффективности стружкообразования // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XI Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 8 февр. 2019 г.– Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2019.– С. 209-210.– [Электронный ресурс]: 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

3. Карпов А.В. Энергетический критерий оптимизации технологических процессов обработки резанием // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 5. – С. 50-55; URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=38031> (дата обращения: 30.12.2022).



Карпов А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
krash75@mail.ru*

### **Обеспечение эффективности эксплуатации режущего инструмента на основе энергетического подхода к стружкообразованию**

Эффективные условия обработки заготовок деталей машин режущим инструментом устанавливаются путём осуществления структурной и параметрической оптимизации как технологического процесса в целом, так и отдельных технологических операций, технологических переходов, рабочих ходов, в совокупной последовательности формирующих наиболее выгодный маршрут обработки. При этом важное значение приобретает выбор критерия оптимальности (экономического или физического), приводимого к виду целевой функции, и системы принимаемых ограничений.

Величина экономических критериев рассчитывается на основе факторов экономического анализа технологических процессов, действующих на конкретном предприятии. В современных условиях как сами экономические факторы, так и действующие алгоритмы их определения, зачастую носят конъюнктурный, плохо прогнозируемый характер при переходе от анализа хозяйственной деятельности одного предприятия к другому. В связи с этим, использование экономических критериев для разработки научно-обоснованной методики повышения эффективности технологических процессов затруднительно.

В некоторых случаях истинный экстремум целевой функции оказывается за пределами допустимой области определения принятого критерия. В таких ситуациях, особенно при отсутствии возможности бесступенчатого регулирования привода рабочего оборудования, оптимальные режимы резания перестают зависеть от частного критерия, и за таковые следует принимать значения управляемых параметров, соответствующие условному экстремуму целевой функции, лежащему на пересечении с границей наиболее жёсткого ограничения [1].

Для решения подобного рода задач целесообразно использовать безразмерные показатели энергетической эффективности процесса, потому что основу любого из известных методов механических воздействий на материал составляет получение необходимого продукта за счёт трансформации одного вида энергии в другой, т.е. за счёт совершения некоторой работы.

Резание металлов, как обособленный класс технологических операций, объединяет способы механической обработки, представляющие собой целенаправленное разрушение сплошности заготовки режущим инструментом, имеющим клиновое строение рабочей части; при этом с заготовки удаляется в виде стружки определённый слой материала (срезаемый слой), в результате чего образуются новые поверхности детали, характеризующиеся формой, размерами, точностью и свойствами.

Производительность обработки, стойкость инструмента, показатели качества поверхностей функционально зависят от величины и взаимного соотношения главных составляющих энергетического баланса зоны резания – запасённой  $\Delta U$  и тепловой  $Q$  энергий, соответственно накапливаемой и генерируемой за время рабочего хода [2]:

$$A_{рез} = \Delta U + Q, \quad (1)$$

где  $A_{рез}$  – работа, совершаемая режущим инструментом (работа резания).

Избыточная величина механической работы, затрачиваемой на стружкообразование, приводит к росту энтропии в технологической системе.

Снижение энергетических затрат на обработку резанием способствует образованию более качественного поверхностного слоя детали вследствие уменьшения глубины и степени упрочнения, уровня растягивающих остаточных напряжений, что благоприятно отражается на повышении долговечности изделий в эксплуатации.

Таким образом, оптимизация условий резания по энергетическому критерию имеет целью обеспечить проведение процесса с наибольшей энергоэффективностью, которую можно записать в виде безразмерного отношения [3]:

$$K = \frac{\Delta w}{e} \rightarrow 1 \quad (2)$$

где  $\Delta w$  – удельная энергоёмкость обрабатываемого материала, Дж/мм<sup>3</sup>;

$e$  – удельная энергоёмкость процесса стружкообразования (удельная работа резания), Дж/мм<sup>3</sup>.

Физический смысл показателя  $K$  может быть сформулирован, если принять следующую гипотезу: для разрушения объёма материала необходимо, чтобы энергия, переданная ему инструментом, достигла величины критической внутренней энергии, свойственной этому материалу при данных условиях.

Очевидно, использование критерия  $K$  для повышения эффективности эксплуатации инструментов на предварительных и окончательных технологических переходах должно способствовать нахождению параметров обработки, обеспечивающих соответственно максимальную производительность стружкообразования и заданное качество поверхности детали при наименьшей величине энергетических затрат в зоне резания.

Величину удельной энергоёмкости обрабатываемого материала  $\Delta w$  рекомендуем определять в зависимости от превалирующего при заданных условиях стружкообразования вида разрушения (вязкое, квазихрупкое, хрупкое).

Определение величины  $\Delta w$  на предварительных стадиях технологического процесса (черновая обработка) можно осуществлять в зависимости от типа стружки, поскольку тип стружки обусловлен механизмом и интенсивностью протекания пластической деформации материала при внедрении режущего клина. Установить род и величину превалирующих напряжений, обеспечивающих стружкообразование, рассчитать их работу можно по форме и размерам стружки. Стружкообразование происходит либо по механизму сдвига, вызываемому касательными напряжениями в плоскостях сдвига, либо по механизму отрыва, вызываемому действием нормальных напряжений. Удельную энергоёмкость  $\Delta w$  при образовании стружек сдвига (элементная, суставчатая, сливная) можно принять равной удельной работе деформации, определяемой произведением касательных напряжений на величину относительного сдвига [4].

Удельная энергоёмкость резания  $e$  представляет собой работу режущего инструмента по образованию единичного объёма стружки. Величина  $e$ , помимо вида и свойств обрабатываемого материала, зависит от конкретных условий осуществления рабочего хода: параметров инструмента (типоразмер, материал, геометрия режущей части, число зубьев и т.д.), элементов режима резания (глубина резания, подача, скорость резания), типа СОТС (при наличии) и других, которые все вместе составляют систему управляемых (оптимизируемых) технологических параметров [5].

### Литература

1. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов.– М.: Машиностроение, 1979.- 160 с.
2. Якубов Ф.Я. Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов. - Ташкент: Фан, 1985.- 105 с.
3. Карпов А.В. Энергетический критерий оптимизации технологических процессов обработки резанием // Современные наукоёмкие технологии. – 2020. – № 5. – С. 50-55; URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=38031> (дата обращения: 30.12.2022).
4. Карпов А.В. К вопросу повышения энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием // Современные наукоёмкие технологии. – 2019. – № 3. – С. 43-47; URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37439> (дата обращения: 30.12.2022).
5. Карпов А.В. Модель параметрической оптимизации операций обработки резанием по критерию наибольшей энергетической эффективности // Современные наукоёмкие технологии. – 2020. – № 6-1. – С. 50-55; URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=38070> (дата обращения: 30.12.2022).

Карпов А.В.

Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
krash75@mail.ru

### Экспериментальные зависимости энергетической эффективности фрезерования от способа фрезерования и числа зубьев фрезы

На основе термодинамических представлений о стружкообразовании нами был сформулирован безразмерный показатель  $K$ , позволяющий оценивать энергетическую эффективность рабочего хода режущего инструмента в пределах технологического перехода технологической операции обработки резанием. Показатель  $K$  был представлен в виде отношения удельной энергоёмкости обрабатываемого материала  $\Delta w$ , Дж/мм<sup>3</sup>, к удельной работе резания  $e$ , Дж/мм<sup>3</sup>, и характеризует собой энергетический КПД стружкообразования:

$$K = \frac{\Delta w}{e} \quad (1)$$

Теоретические выражения для показателя  $K$  были получены для различных распространённых методов обработки резанием, в том числе - для фрезерования.

В течение 2020-22 гг. каф. технологии машиностроения Муромского института (филиала) ВлГУ были проведены экспериментальные исследования зависимости показателя  $K$  от управляемых технологических факторов обработки: геометрических параметров инструмента, элементов режима резания, способа осуществления обработки. Цель экспериментальных исследований состояла в подтверждении теоретических выражений и получении эмпирических зависимостей показателя энергетической эффективности резания от перечисленных технологических факторов.

При фрезеровании на станке модели 6М82 плоской заготовки шириной  $B = 65$  мм из стали 30 (1030, G10300) ( $\sigma_b = 500$  МПа, НВ 179,  $\psi_b = 0,2$ ) удельная энергоёмкость материала была принята равной удельной работе пластической деформации сдвига и составила  $\Delta w = 1,136$  Дж/мм<sup>3</sup>. В качестве режущих инструментов применялись цельные быстрорежущие фрезы: фреза I - 2200-0154 ГОСТ 3752-71 (P14Ф4,  $D = 80$  мм,  $d = 27$  мм,  $L = 80$  мм,  $z = 16$ ,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\alpha = 16^\circ$ ,  $\omega = 30^\circ$ ); фреза II - 2200-0198 ГОСТ 3752-71 (P14Ф4,  $D = 80$  мм,  $d = 27$  мм,  $L = 80$  мм,  $z = 10$ ,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\alpha = 16^\circ$ ,  $\omega = 40^\circ$ ). Зависимости показателя  $K$  от способа фрезерования и числа зубьев фрезы обобщены на рис. 1, 2.

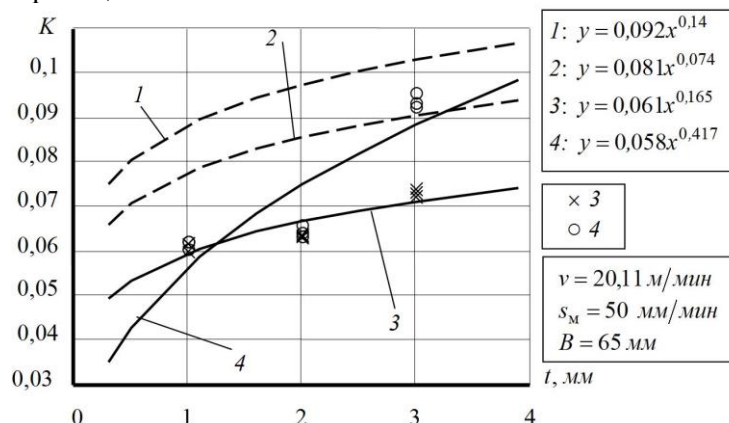


Рис. 1. Зависимости показателя энергетической эффективности встречного цилиндрического фрезерования заготовки фрезами с различным числом зубьев от глубины резания:

- 1 – теоретическое уравнение для фрезы II; 2 – теоретическое уравнение для фрезы I;
- 3 – экспериментальные данные и линия тренда для фрезы I; 4 – экспериментальные данные и линия тренда для фрезы II

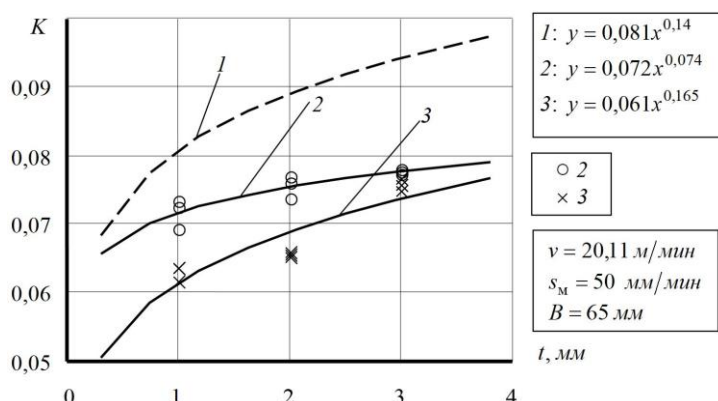


Рис. 2. Зависимости показателя энергетической эффективности встречного и попутного цилиндрического фрезерования заготовки фрезой 2200-0154 ГОСТ 3752-71 (P14Ф4, D = 80 мм, d = 27 мм, L = 80 мм, z = 16,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\alpha = 16^\circ$ ,  $\omega = 30^\circ$ ) от глубины резания: 1 – теоретическое уравнение; 2 – экспериментальные данные и линия тренда для попутного фрезерования; 3 – экспериментальные данные и линия тренда для встречного фрезерования

Для снижения энергозатрат следует снимать припуск за один проход, поскольку потребляемая мощность в этом случае возрастает менее интенсивно, чем объёмная производительность. При обработке заготовок прогрессивной формы (поковки, отливки) в условиях крупносерийного типа производства рациональные величины припусков по переходам устанавливаются специальным расчётом, поэтому глубину резания  $t$  можно считать стационарным технологическим фактором.

Относительно фактора глубины резания были исследованы зависимости показателя  $K$  от числа зубьев цилиндрической фрезы  $z$  и способа фрезерования (встречное, попутное).

Цилиндрическое фрезерование по подаче (попутное фрезерование) оказалось менее энергоёмким, чем встречное (в среднем на 9-12%) при одинаковых режимах обработки и параметрах инструмента. При повышении глубины резания  $t$  с 1 до 3 мм относительная эффективность попутного фрезерования по сравнению со встречным снижается в 5-6 раз. Следовательно, преимущества попутного фрезерования отчётливо проявляются при чистой обработке.

Снижению шероховатости обработанной поверхности при многолезвийной обработке способствует увеличение числа зубьев  $z$  инструмента. Однако, с увеличением глубины резания  $t$  энергетически более эффективным становится применение крупнозубых фрез взамен мелкозубых. Об этом свидетельствуют опытные данные, полученные при обработке заготовки фрезами I и II, различающимися лишь числом зубьев  $z$ . Относительная эффективность крупнозубой фрезы II по сравнению с мелкозубой фрезой I повышается с 1 до 29% при увеличении глубины резания с 1 до 3 мм. Следует учесть, что при одинаковой минутной подаче и скорости резания уменьшение числа зубьев фрезы сопровождается пропорциональным ростом подачи на зуб, которое, в свою очередь, способствует возрастанию показателя энергетической эффективности  $K$  и снижению энергозатрат  $e$ . Большой объём винтовых канавок обеспечивает свободное размещение фрагментов стружки во впадинах крупнозубых фрез, что является необходимым условием безаварийной работы фрезерных станков при высоких значениях глубины резания и минутной подачи.

### Литература

1. Карпов А.В. Расчёт показателя энергетической эффективности стружкообразования при точении и фрезеровании // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 7 февр. 2020 г. – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2020. – С. 141-142. – [Электронный ресурс]: 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Карпов А.В.

Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
krash75@mail.ru

### Экспериментальные зависимости энергетической эффективности фрезерования от элементов режима резания

Ранее [1] на основе термодинамических представлений о стружкообразовании нами был сформулирован безразмерный показатель  $K$ , позволяющий оценивать энергетическую эффективность рабочего хода режущего инструмента в пределах технологического перехода технологической операции обработки резанием. Показатель  $K$  был представлен в виде отношения удельной энергоёмкости обрабатываемого материала  $\Delta w$ , Дж/мм<sup>3</sup>, к удельной работе резания  $e$ , Дж/мм<sup>3</sup>, и характеризует собой энергетический КПД стружкообразования:

$$K = \frac{\Delta w}{e} \quad (1)$$

Теоретические выражения для показателя  $K$  были получены для различных распространённых методов обработки резанием: продольного наружного точения и растачивания, поперечного точения и отрезки, цилиндрического и торцового фрезерования, разрезания цилиндрической заготовки дисковой пилой и др.

В течение 2020-22 гг. каф. технологии машиностроения Муромского института (филиала) ВлГУ были проведены экспериментальные исследования зависимости показателя  $K$  от управляемых технологических факторов обработки резанием: скорости резания  $v$ , величины подачи  $s$ , глубины резания  $t$ , геометрических параметров инструмента. Цель экспериментальных исследований состояла в подтверждении теоретических выражений и получении эмпирических зависимостей показателя энергетической эффективности резания от перечисленных технологических факторов.

При цилиндрическом фрезеровании на станке мод. 6М82 плоской заготовки шириной  $B = 65$  мм из стали 30 (1030, G10300) ( $\sigma_b = 500$  МПа, НВ 179,  $\psi_b = 0,2$ ) удельная энергоёмкость материала была принята равной удельной работе пластической деформации сдвига и составила  $\Delta w = 1,136$  Дж/мм<sup>3</sup>. В качестве режущего инструмента применялась цельная быстрорежущая фреза 2200-0154 ГОСТ 3752-71 (P14Ф4,  $D = 80$  мм,  $d = 27$  мм,  $L = 80$  мм,  $z = 16$ ,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\alpha = 16^\circ$ ,  $\omega = 30^\circ$ ). Зависимости показателя  $K$  от элементов режима резания при фрезеровании обобщены на рис. 1-3.

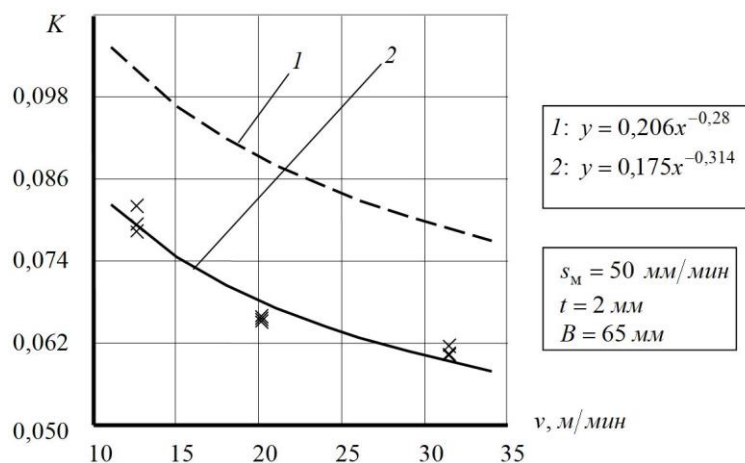


Рис. 1. Зависимости показателя энергетической эффективности встречного цилиндрического фрезерования от скорости резания: 1 – теоретическое уравнение; 2 – экспериментальные данные и линия тренда

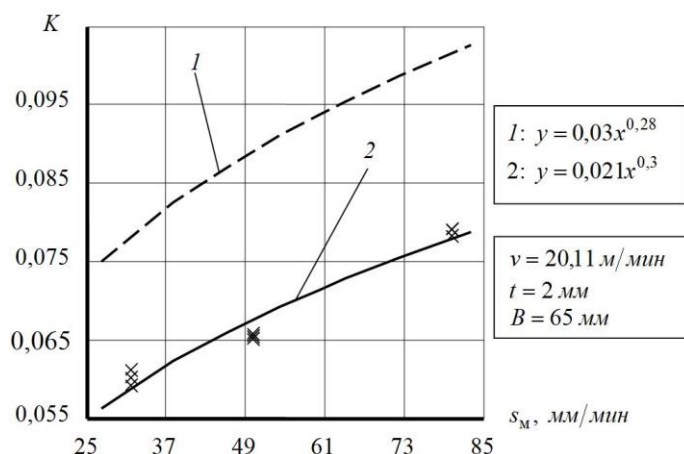


Рис. 2. Зависимости показателя энергетической эффективности цилиндрического фрезерования от минутной подачи: 1 – теоретическое уравнение; 2 – экспериментальные данные и линия тренда

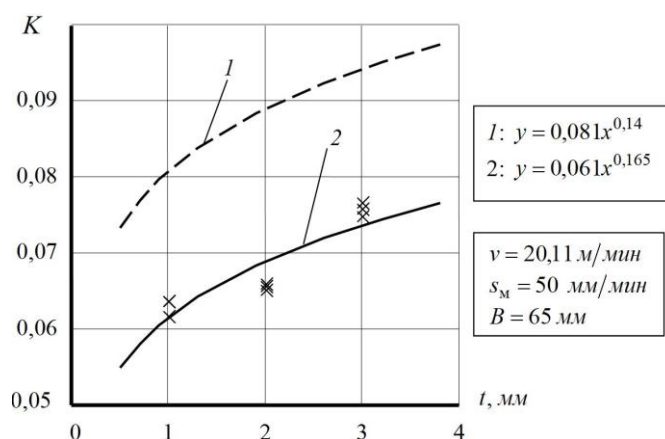


Рис. 3. Зависимости показателя энергетической эффективности цилиндрического фрезерования от глубины резания: 1 – теоретическое уравнение; 2 – экспериментальные данные и линия тренда

С увеличением скорости резания с 12,57 до 31,42 м/мин (в 2,5 раза) показатель энергетической эффективности фрезерования  $K$  снижается на 24%. Это вызвано тем, что пропорционально росту частоты вращения шпинделя  $n$  происходит уменьшение подачи на зуб, поскольку минутная подача  $s_m$  остаётся постоянной. С другой стороны, при постоянной скорости резания увеличение минутной подачи  $s_m$  с 31,5 до 80 мм/мин (в 2,5 раза) способствует повышению показателя  $K$  в среднем на 31%. Анализируя эти результаты совместно, можно подтвердить мнение об увеличении показателя энергетической эффективности фрезерования  $K$  с ростом подачи на зуб как за счёт уменьшения частоты вращения шпинделя при постоянной минутной подаче, так и за счёт повышения минутной подачи при неизменной скорости резания, причем второй вариант увеличения подачи на зуб предпочтительнее первого в среднем на 29%.

Показатель  $K$  повышается и с нарастанием срезаемого припуска: при увеличении глубины резания  $t$  с 1 до 3 мм (в 3 раза) степенная функция  $K=f(t)$ , аппроксимирующая эмпирические точки, возрастает на 20%.

### Литература

1. Карпов А.В. Расчёт показателя энергетической эффективности стружкообразования при точении и фрезеровании // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции. Муром, 7 февр. 2020 г.– Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2020.– С. 141-142.– [Электронный ресурс]: 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Козлов А.М., Кишкинская М.А.  
Новомосковский институт (филиал)  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего  
образования «Российский химико-технологический университет  
имени Д.И. Менделеева  
301665, Тульская область, г. Новомосковск, ул. Дружбы, д.8  
marinanirhtu2009@rambler.ru

### **Особенности распределения бора в диффузионных слоях на нержавеющей стали**

В настоящее время борирование применяется в промышленности для повышения износостойкости деталей, в основном изготавливаемых из конструкционных сталей. Применение этого метода для высоколегированных, особенно нержавеющей сталей вызывает затруднения, хотя нержавеющие стали широко применяются в качестве конструкционного материала для изготовления деталей и узлов машин и агрегатов, эксплуатация которых осуществляется в сложных условиях одновременного воздействия агрессивных сред, высоких температур, интенсивных истирающих и знакопеременных нагрузок. Обладая высокими антикоррозионными свойствами, нержавеющие стали в своей основе мягки и плохо сопротивляются износу. Борирование могло бы существенно повысить их износостойкость при сохранении коррозионной стойкости в ряде сред [1].

Было проведено исследование влияния основных легирующих элементов нержавеющей сталей на механизм формирования борированного слоя. Борирование осуществлялось из порошковой среды в контейнерах с плавким затвором. Изучению подвергались два типа сталей: хромистые и хромоникелевые лабораторных плавок на основе технически чистого железа. В качестве модельного материала сравнения использовалось технически чистое железо-армко (суммарное содержание других элементов – до 0,08 – 0,1 %, в том числе углерода – до 0,02 %).

Хромистые стали по своему составу были выбраны с содержанием 6,13,17 и 22% хрома (близким к стандартным промышленным маркам 08Х6 и т.д.), что позволяло с достаточной степенью систематичности проверить влияние основного легирующего элемента на борированность этих сталей.

Состав хромоникелевых сталей был выбран по двум сечениям диаграммы Fe-Ni-Cr. При постоянном содержании хрома 17% менялась концентрация никеля: 2; 10; 25% вес., и при постоянном содержании никеля 10% менялась концентрация хрома: 6; 13; 17; 23%. Поскольку стали лабораторных плавок выплавлялись на основе технически чистого железа содержание углерода в них не превышало 0,06% (S, P ≈ 0,02%).

Анализ структуры борированного слоя выполнялся на поперечных шлифах образцов на металлографическом микроскопе МИМ-8.

Изучение тонкой структуры слоя выполнялось растровой электронной микроскопией на приборе «Стереоскан» в режиме вторичной электронной эмиссии.

Распределение элементов (Cr, Ni, Fe) по слою определялось полуколичественным методом на микроанализаторе «Камека» с поверхности поперечных нетравленных шлифов при локальности пучка 6 мкм.

Металлография борированных слоёв и обычно применяемые методы выявления распределения и концентрации бора (химический и спектральный) по глубине слоя – не дают достаточного представления о характере размещения бора в переходной зоне и глубине его проникновения.

Метод трековой автордиографии позволяет фиксировать бор вплоть до концентрации его порядка  $10^{-4}$ % вес. Применение данного метода даёт возможность проследить распределение бора по глубине диффузионного слоя, что металлографически выявить невозможно.

Результаты изучения распределения бора по глубине диффузионных слоёв методом автордиографии на исследуемых сталях и анализ флуктуации его концентраций подробно описаны в работе автора [2].

Все вышеперечисленные методики изучения борированных сталей позволили сделать предположение об особенностях механизма формирования борированного слоя на

высоколегированных нержавеющей сталей. Обсуждая теорию формирования борированного слоя следует отметить, что поскольку бор является элементом внедрения, то в процессе диффузии в металлический сплав перемещается в первую очередь по несовершенствам его кристаллического строения: границы зёрен, плоскости спайности, дислокации и вакансии в объёме зерна.

Механизм диффузионного насыщения металла бором можно представить следующим образом. Вещества, транспортирующие бор из шихты диссоциируют при контакте с насыщаемой поверхностью, образуя активный атом бора, который и адсорбируется на ней непосредственно в зоне диссоциации. Как известно, при адсорбции происходит снижение свободной поверхностной энергии металл – адсорбент, что в свою очередь способствует интенсификации работы имеющихся дислокационных источников. В результате плотность дислокаций возрастает до тех пор, пока обратные напряжения не заблокируют действие этих дислокационных источников. Наличие дислокаций и их перемещение обуславливает повышение плотности вакансий, что может провоцировать интенсивность диффузии бора, а так же железа и легирующих элементов. Природа легирующих элементов, их концентрация и степень растворимости бора в стали, безусловно, оказывают влияние на продолжительность функционирования дислокационных источников и размеры повышенной плотности дислокаций, а это в свою очередь может способствовать ускорению диффузии бора по трубочному механизму. При диффузии бора вглубь матрицы из-за расклинивающего эффекта возникают напряжения, значения которых может превосходить напряжения зарождения дислокаций, по которым продвигается фронт диффузии.

Обнаруженные при изучении автордиографии скопления атомов бора (области предвыделения боридов) свидетельствуют о повышении концентрации бора в твёрдом растворе и возникновению зародышей низших боридов ( $Fe_2B$ ). Последние могут возникать в областях больших концентраций кристаллического строения по границам зёрен, плоскостях скольжения кристаллов. На высоколегированных сталях, где содержатся элементы, повышающие стабильность высокого статического веса энергетически устойчивых электронных конфигураций (в частности хрома), происходит торможение «переползания» дислокаций, а следовательно, и диффузии бора по объёму зерна, что способствует насыщению бором до критических концентраций и зарождению центров образования боридов железа и легирующих элементов (т.н. комплексных боридов).

Наличие пор в прослойке на хромоникелевых сталях связано с действием значительных внутренних напряжений, величина которых определяется разницей в коэффициентах линейного расширения комплексных боридов и матрицы, а так же переход легирующих элементов через границу с прослойкой, способствует образованию вакансий, коагуляция которых и вызывает интенсивное порообразование на границе слоя боридов. Всё вышеизложенное относительно строения боридных слоёв на хромоникелевых сталях может являться как причиной низкого качества боридных покрытий на них, причинами самопроизвольного шелушения покрытия в процессе охлаждения, так и отслаивание его в процессе эксплуатации борированных деталей.

### Литература

1. Козлов А.М., Кишкинская М.А., Каменский М.Н. Исследование износостойкости борированных хромистых нержавеющей сталей. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. № 2, С. 34 – 39.
2. Козлов А.М., Гринберг Е.М. Особенности распределения бора по глубине борированного слоя на высоколегированных сталях, выявленного методом трековой автордиографии. Инженерная механика, материаловедение и надёжность оборудования.: Межрегиональный сб. научных трудов/ Вып. №2. НИ РХТУ. Новомосковск, 1998, 107 с. С.15 – 19.



Никитина Л.Г., Захаров О.А.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: nikitina-nlg@yandex.ru*

### **Алгоритм проектирования мехатронного станочного оборудования**

Современные металлорежущие станки широко используют мехатронные устройства, позволяющие наиболее эффективно решать сложные технологические задачи и выполнять дополнительные функции.

Мехатронные устройства выполняют следующие функции: контроль установки заготовок и спутников; контроль точности обработки; диагностирование узлов и инструмента; оптимизация режимов резания; компенсации деформаций узлов и т.д. [1].

Мехатронные устройства используются в рабочих органах для осуществления в них основных операций, для улучшения отдельных эксплуатационных операций, для адаптации механизмов к изменяющимся условиям и в других случаях.

Мехатронные устройства объединяют три составные части: силовую (энергетическую) систему, осуществляющую механические перемещения, информационную систему и систему управления. Информационная система позволяет получать информацию о состоянии всех элементов энергетической системы и связывает их с системой управления. Электронная система управляет мехатронным устройством, обычно это управление осуществляется путем воздействия на силовой электрический преобразователь и координируется по сигналам датчика.

В качестве мехатронного привода вращения токарного станка может использоваться мотор-шпиндель. Мотор-шпиндель представляющий собой шпиндельную бабку со встроенным регулируемым асинхронным электродвигателем, ротор которого установлен на шпинделе. Частота вращения ротора регулируется изменением частоты питающего напряжения. Для сохранения постоянного положения оси ротора при различных радиальных и осевых нагрузках отклонения ротора контролируются радиальными и осевыми датчиками, установленными в корпусе. Сигналы рассогласования преобразуются управляющей вычислительной машиной в ток электровозбуждения в обмотках, чем регулируется сила магнитного поля, которая позволяет при отклонениях ротора вернуть его в течение нескольких миллисекунд в исходное положение.

Этапы проектирования мехатронного привода подачи (МПП) для многоцелевого станка следующие. На первом этапе параметры МПП находят из условия обеспечения требуемой суммарной жесткости. Далее формируют уточненную модель привода подачи, определяют ожидаемые показатели работы МПП и уточняют его конструкцию. С учетом необходимой эффективности и надежности технологического процесса устанавливают требуемые технико-экономические показатели станка. На основании результатов моделирования разрабатывают методы повышения технико-экономических показателей (ТЭП) станка. При этом определяют способы компенсации неточности станка, уточняют алгоритмы его работы и структуру, разрабатывают блок-схемы контуров системы адаптивного или интеллектуального управления[2].

На основании автоматизированного проектирования с определением ТЭП, уточняют конструкцию станка, организуют технологическую подготовку производства, изготавливают и испытывают опытный образец станка.

Технологическую документацию целесообразно разрабатывать с использованием современных САПР ТП и пакетов прикладных программ. Моделирование привода предусматривает разработку и исследование имитационных, структурных и динамических моделей в целях определения ожидаемых отклонений относительно положения инструмента и заготовки при условии производительной и экономической работы станка

При разных схемах обработки на одном станке возможно получение деталей различного качества. Если заданные требования к показателям качества для первоначально выбранной схемы обработки не выполняются, то принимают решение об ее изменении или изменяют типоразмер и конструкцию привода МПП с последующей проверкой.

При разработке модели привода подачи следует принимать во внимание ряд факторов: характер управляющего воздействия для обеспечения повышенной плавности хода; изменение действующих сил в процессе работы; используемые методики повышения виброустойчивости.

### **Литература**

- 1.Аверьянов О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ.- М.Машиностроение 1987г.
2. Кудояров Р.Г. Вопросы синтеза функциональных структур мехатронных станков// Мехатроника - 2001г. №7

Рулькова К.С., Федько С.С.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: oid@mivlgu.ru*

### **Повышение прочности деталей с винтовыми поверхностями**

В технике достаточно много деталей машин, выход из строя которых связан с усталостными нагрузками.

При выходе из строя деталей под действием объемных усталостных нагрузок, когда происходит усталостный излом, необходимо повышение усталостной прочности. Для повышения усталостной прочности используются конструктивные и технологические мероприятия. Конструктивные мероприятия в основном сводятся к уменьшению концентраций напряжений в местах, где обычно возникают усталостные трещины, ведущие к поломкам деталей. Технологические мероприятия сводятся к упрочнению поверхностных слоев детали [1]. Одним из наиболее эффективных способов повышения усталостной прочности является поверхностное пластическое деформирование (ППД), в результате которого формируется наклепанный поверхностный слой.

Наклеп поверхностного слоя обычно характеризуется повышенной твердостью, глубиной и величиной остаточных напряжений. С увеличением глубины и интенсивности наклепа усталостная прочность металлов повышается. Изменение характеристики наклепа зависит от метода и режима обработки. Установлено, что величина предела выносливости повышается с увеличением глубины и степени упрочнения [2-4]. При переменных напряжениях опасными являются напряжения растяжения в поверхностных слоях, вызванные действующей нагрузкой. При упрочнении ППД в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения, которые суммируются с напряжениями растяжения, возникающими при работе детали, и уравнивают их. В результате долговечность таких деталей увеличивается.

Другим видом разрушения деталей под действием усталостных нагрузок является контактно-усталостное изнашивание, которое возникает на поверхностях контактирующих поверхностей при качении. Оно проявляется в виде растрескивания и крошения контактирующих поверхностей в результате действия контактных напряжений, под влиянием которых на небольшой глубине у поверхности возникают максимальные по величине циклические касательные напряжения. Эти напряжения приводят к возникновению трещин, выходящих на поверхность, при этом некоторые частицы материала отделяются.

Для снижения контактно-усталостного изнашивания необходимо повышение твердости поверхностного слоя деталей. При использовании упрочнения толщина упрочненного слоя должна быть больше глубины распространения максимальных касательных напряжений, а материал основного металла должен обладать достаточной твердостью, предупреждающей продавливание упрочненного слоя под действием контактных давлений. В противном случае возникает опасность отслаивания и растрескивания упрочненного слоя. Для повышения контактно-усталостной прочности достаточно хорошо зарекомендовали себя поверхностная термическая обработка, химико-термическая обработка, а также способы ППД [5].

В технике, как правило, в реальных условиях работы, детали испытывают целый комплекс нагрузок, что необходимо учитывать для повышения их прочностных характеристик. К таким деталям относятся детали с винтовыми поверхностями, например ходовые и грузовые подъемные винты, детали для передач вращения, червяки и др. Часто такие детали при эксплуатации одновременно испытывают как объемные, так и контактные циклические напряжения.

Так для детали «Винт» изготовленной из стали 40Х в результате использования системы прочностного анализа АРМ FEM для КОМПАС-3D был проведен расчет на усталостную прочность (рис. 1).

Система APM FEM представляет собой интегрированный в КОМПАС-3D инструмент для подготовки и последующего конечно-элементного анализа трехмерной твердотельной модели (детали или сборки). Подготовка геометрической 3D-модели и задание материала осуществляется средствами системы КОМПАС-3D. С помощью APM FEM можно приложить нагрузки различных типов, указать граничные условия, создать конечно-элементную сетку и выполнить расчет. При этом процедура генерации конечных элементов проводится автоматически.

Исходными данными для расчета усталостной прочности являются напряженно-деформированные состояния, соответствующие максимальному и минимальному силовому воздействию на конструкцию при циклическом нагружении. Предполагается, что все силы, действующие на конструкцию, изменяются по одному закону [6].

В результате установлено, что наиболее опасным участком такой детали будет место перехода от винтовой поверхности к цилиндрической. Следовательно, упрочнению необходимо подвергать не только винтовую поверхность, чтобы повысить контактно-усталостную прочность, но и другие поверхности, имеющие значительные концентраторы напряжений. Учитывая это, представляется целесообразным применение упрочнения ППД, которое показало достаточную эффективность как для повышения усталостной, так и контактно-усталостной прочности.

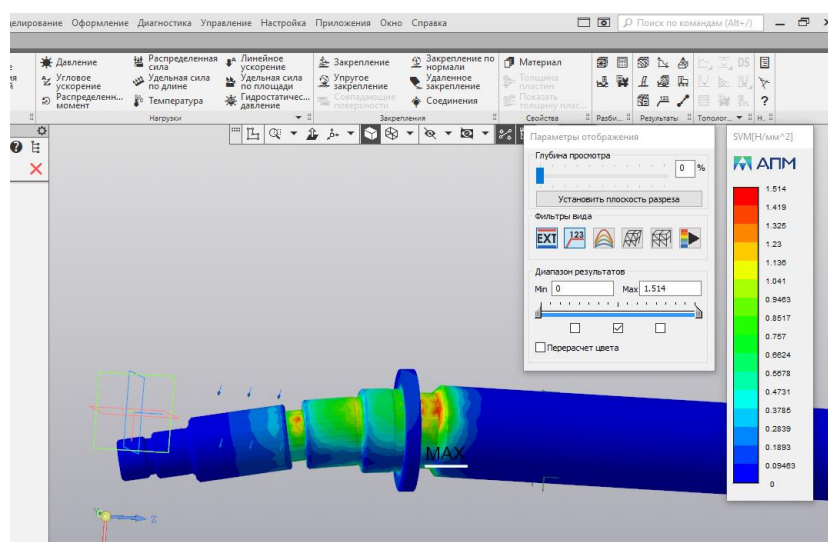


Рисунок 1. Результаты расчета на усталость по коэффициенту запаса усталостной прочности

### Литература

1. Лодыгина Н.Д. Метод расчета напряжений деталей винтовых механизмов при циклическом нагружении // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2.
2. Физико-технологические основы методов обработки: Учеб.пособие. /Под ред. А.П.Бабичева. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 430 с.
3. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. –151 с.
4. Круцило В.Г. Исследование влияния остаточных напряжений и деформационного упрочнения в поверхностном слое деталей на усталостную прочность // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки, 2006, С. 126-130
5. Исследование контактного выкрашивания поверхностей деталей машин / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, Д.Е. Тарасов // В кн. «Контроль и диагностика при обеспечении качества машиностроительных изделий». Коллективная монография под ред. А.В. Киричека и К.В. Подмастерьева - М.: Издательский дом «Спектр», 2012. С. 294-332
6. APM FEM Система прочностного анализа для КОМПАС-3D. Руководство Пользователя. [Электронный ресурс] // Научно-технический центр «АПМ» URL: <https://apm.ru/downloads/188/APM-FEM-2022.pdf> (Дата обращения: 05.01.2023)

Силантьев С.А.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: amitp@yandex.ru*

### **Оборудование для исследования процессов волнового деформационного упрочнения**

Одним из наиболее эффективных способов упрочнения поверхностным пластическим деформированием является волновое деформационное упрочнение (ВДУ). Способ заключается в применении ударной системы с промежуточным звеном, генерирующей волну деформации в элементах ударной системы - бойке и волноводе, сообщении ее в очаг деформации, формировании волновых состояний не только в поверхностном слое, но и в объеме материала упрочняемой детали. Высокая эффективность способа обеспечивается за счет наиболее полного использования энергии волны деформации на упруго-пластическую деформацию упрочняемого материала путем предварительного статического поджатия системы «инструмент - волновод» к обрабатываемой поверхности и последующего динамического нагружения бойком. Статическое поджатие обеспечивает рекуперацию отраженных волн деформации. Значимые эффекты, вызванные деформацией среды, наблюдаются на глубине 6-8 мм, степень упрочнения достигает 150 % [1]. В зависимости от требуемых параметров упрочнения поверхностного слоя подбираются элементы ударной системы, генерирующие ударный импульс требуемой амплитуды и длительности [2]. За счет управления параметрами волны деформации появляется возможность формировать не только равномерно упрочненный поверхностный слой, но и гетерогенно упрочненные области [2].

При проведении инженерных расчетов конечностью габаритных размеров деталей в исследуемых моделях, как правило, пренебрегают. Это позволяет, с одной стороны, значительно упростить алгоритм и сократить время расчета, а с другой - распространить полученные результаты расчета на все без ограничений детали, выполненные из рассматриваемого материала, вне зависимости от их формы и размеров, исключить учет влияния масштабного фактора на исследуемый процесс. Однако вследствие волнового характера упрочнения форма и размеры детали могут оказывать существенное влияние на характер упрочнения, так как на всех границах с различными акустическими жесткостями происходит деление проходящей волны деформации на прямую и отраженную волны. При изготовлении детали из монолитной заготовки однородного материала изменение акустической жесткости связано с изменением размеров конструктивных элементов (толщина стенок, размеры и расположение отверстий, бобышек и т.д.), а также с габаритными размерами, так как на наружных поверхностях исследуемого образца тоже происходят волновые преобразования. Возникающие в каждой элементарной точке детали волновые состояния определяются сложением всех проходящих через точку прямых и отраженных волн. С учетом того, что скорость распространения волны деформации соответствует скорости звука в материале, длительность единичного импульса составляет порядка  $10^{-5} \dots 10^{-4}$  с, а скорость рабочей подачи многократно меньше, волновые состояния в одной и той же элементарной точке детали в процессе обработки непрерывно меняются. Предварительными исследованиями установлено значимое влияние на процесс ВДУ геометрических размеров, так как при равных объемах упрочняемых образцов и аналогичных режимах обработки имеют место разные карты распределения микротвердости в поверхностном слое. Следовательно, при исследовании ВДУ ответственных деталей не следует исключать влияние конечных размеров на процесс упрочнения.

Экспериментальное оборудование для исследования процессов ВДУ можно условно разделить на два основных типа.

К первому типу оборудования относится стенд для ВДУ, представляющий собой полноразмерную промышленную установку, позволяющую упрочнять большую номенклатуру изделий разных габаритных размеров [2]. Она позволяет управлять в широком диапазоне

энергией удара, формировать серии пластических отпечатков удара инструмента с точной регулировкой их перекрытия между собой. Однако использование данного стенда для исследований взаимосвязей между параметрами волны деформации, формой и размерами упрочняемых образцов невозможно из-за невозможности замены элементов ударной системы, от которых зависит формирование волн деформации с заданными параметрами. Для замены элементов ударной системы необходимо рассчитывать и изготавливать не только новые боек и волновод, но и новый корпус генератора импульсов, что достаточно трудоемко и дорого.

Ко второму типу относятся стенды, позволяющие моделировать процесс ВДУ за счет одноконтантного воздействия волны деформации на упрочняемую поверхность [2]. Они представляют собой макеты ударных систем, позволяющие производить замены их элементов (бойка и волновода). Данный тип стендов обеспечивает статическое поджатие волновода и инструмента к обрабатываемой поверхности за счет пружин. Стенды данного типа могут работать как в режиме регистрации ударного импульса, так и в режиме формирования единственного отпечатка на обрабатываемой поверхности. Принципиальным отличием данных стендов являются невысокие энергетические характеристики нагружения очага деформации.

### Литература

1. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 288 с. (Б-ка технолога).
2. Kirichek A.V., Kuzmenko A.P., Soloviev D.L., Barinov S.V., Altukhov A.Yu., Silantiev S.A., Grechukhin A.N., Myo Min Than, Dobromyslov M.B. Dimensional Effects in Micro-and Nanostructural Changes in Grain and Intragrained Structure of Steel 45 at Static-pulse Treatment // Journal of Nano and Electronic Physics. 2015. Vol. 7, no. 4. P. 04023.

Яшин А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
yashin2102@yandex.ru*

### **Особенности многоконтактного нагружения очага деформации при динамических нагрузках**

Одним из основных параметров эффективности ударной системы является коэффициент передачи энергии, расходуемой на упругопластическую деформацию в упрочняемом материале. Исследованиями установлена возможность повышения производительности и обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя при реализации многоконтактных схем нагружения по сравнению с системами с одним инструментом.

Для проведения экспериментальных исследований формирования ударного импульса в многоконтактной инструментальной системе создан измерительный комплекс, позволяющий моделировать однократное воздействие многоконтактного инструмента на упрочняемую поверхность только при внецентренном торцевом соударении. Однако установлено, что при осевом соударении в очаг деформации передается больший ударный импульс, чем при внецентренном.

Для реализации как осевого, так и внецентренного торцевого соударения измерительный комплекс усовершенствован. В качестве инструмента применены шары диаметром 12 мм. Количество используемых в ударной системе инструментов ограничивается размерами датчика и волновода и варьируется от 1 до 4 штук.

Ранее установлено [1,2], что ударный импульс, формируемый в ударной системе, состоящей из бойка и волновода равных диаметров, обладает наибольшей способностью к передаче энергии удара в очаг деформации, то есть является эталонным. На основании этого, оценку способности ударной системы к передаче энергии можно производить относительно данного эталонного импульса (рисунок 1):

$$K_{\text{ед}} = (A_{\text{и}} / A_{\text{эт}}) \times 100\%, \quad (1)$$

где  $K_{\text{ед}}$  – коэффициент передачи энергии,

$A_{\text{и}}$  – энергия исследуемого импульса,

$A_{\text{эт}}$  – энергия эталонного импульса.

Для определения энергии импульса весь импульс равномерно разбивался на единичные прямоугольные импульсы длительностью  $0,5 \times 10^{-4}$  с. Энергия рассматриваемого импульса определялась по [1]:

$$A_{\text{и}} = \frac{\sum (P_{\text{и}i}^2 t_i)}{\rho F a}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{и}i}$  – сила  $i$ -ого единичного прямоугольного импульса, Н;

$t_i$  – длительность  $i$ -ого единичного прямоугольного импульса, с;

$\rho$  – плотность материала волновода, кг/м<sup>3</sup>;

$F$  – площадь поперечного сечения волновода, м<sup>2</sup>;

$a$  – скорость распространения ударной волны в волноводе, м/с.

В результате исследований подтверждено, что эталонный импульс обладает наибольшей амплитудой и средней длительностью ударного воздействия (0,9 мс). Форма импульса близка к трапецеидальной. Импульс обладает двумя локальными максимумами. Коэффициент передачи энергии данного импульса принят равным 100%.

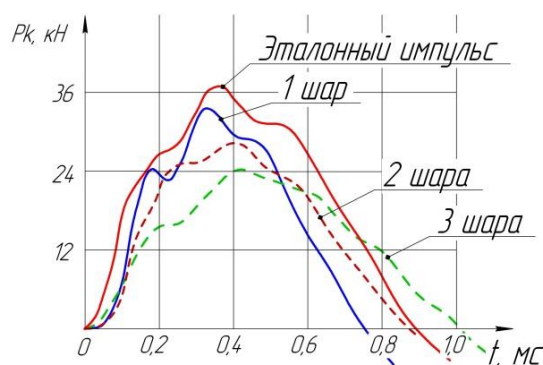


Рисунок 1 – Экспериментальные ударные импульсы при одно- и многоконтактной схеме нагружения с инструментами-шарами

При использовании в качестве инструмента шара диаметром 12 мм ударный импульс характеризуется большой амплитудой и малой длительностью ударного воздействия. Форма ударного импульса близка к треугольной. При этом коэффициент передачи энергии ударного импульса в очаг деформации равен 42% по отношению к эталонному импульсу. При внедрении в систему второго шара диаметром 12 мм длительность импульса увеличивается до 0,9 мс, а амплитуда импульса уменьшается на 20%. Форма импульса близка к трапецеидальной. Коэффициент передачи энергии в очаг деформации снижается незначительно – до 37%. Внедрение в систему третьего и четвертого шаров диаметром 12 мм практически не влияет на длительность импульса, а амплитуда импульса снижается на 10% и 14% соответственно по сравнению с двухконтактной схемой нагружения. Также снижается способность к передаче энергии до 24% и 21% для трех- и четырехконтактной схем соответственно (рисунок 2).



Рисунок 2 – Зависимость коэффициента передачи энергии  $K_{ед}$  от количества инструментов в ударной системе.

Установлено, что при обработке шарами диаметром 12 мм возможно применение двухконтактной схемы нагружения обрабатываемого материала вместо одноконтактной без существенной потери коэффициента передачи энергии.  $K_{ед}$  при этом снижается на 5%, а производительность возрастает в 2 раза. Для трех- и четырехконтактных схем нагружения  $K_{ед}$  снижается на 18% и 21% соответственно (в 2 раза по сравнению с одноконтактной схемой), что скажется на глубине и степени упрочнения поверхностного слоя.

### Литература

1. Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004.- 288 с.
2. Киричек А.В., Баринов С.В., Яшин А.В., Зайцев А.А. Энергетическая закономерность импульсного нагружения системы с промежуточным звеном // Вестник Брянского государственного технического университета, 2017, №1 (54) с.83-90.



Яшин А.В., Фомина А.О.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
yashin2102@yandex.ru*

### **Влияние технологических режимов упрочнения на механические свойства алюминиевых сплавов**

Одним из наиболее эффективных способов упрочнения поверхностным пластическим деформированием является волновое деформационное упрочнение (ВДУ).

Значимые эффекты, вызванные деформацией среды, наблюдаются на глубине 6-8 мм, степень упрочнения достигает 150 %.

Для выбора 2-3 наиболее эффективных режимов обработки алюминиевых сплавов, обеспечивающих наибольшую глубину упрочнения, произведено упрочнение на следующих режимах и следующими инструментами:

Инструменты	Режимы (коэффициент перекрытия К)			
	0,4	0,6	2 прохода: 0,4 и 0,4	2 прохода: 0,4 и 0,6
Шар диаметром 19 мм	+	+	-	-
Шар диаметром 27 мм	+	+	+	+
Стержень со сферическим торцом диаметром 27 мм	+	+	+	+

Ранее при помощи конечно-элементного моделирования установлено, что инструмент с меньшим диаметром (19 мм) обеспечивает большую степень упрочнения на поверхности, но меньшую глубину упрочнения по сравнению с инструментом с большим диаметром (27 мм).

Выбор режимов и инструментов сделан в соответствии с необходимостью обеспечения наибольшей глубины упрочнения, а не максимальной степени упрочнения на поверхности, так как после ВДУ поверхностный слой фрезеруется на глубину 1 мм для удаления следов от обработки. Однако для подтверждения данных моделирования произведено упрочнение на двух режимах инструментами в виде шаров диаметром 19 мм.

Толщина обрабатываемого материала 16 мм. Для проведения исследований микротвердости и ударной вязкости из упрочненного металла вырезались образцы. Размер вырезаемых образцов (Д\*Ш\*В): 55\*11\*16 мм. Для повышения точности исследований по ударной вязкости для каждого режима изготавливалось по 2 образца. Пластические отпечатки от инструмента на упрочненной поверхности удалялись фрезерованием. Глубина резания – 1 мм, так как глубина отпечатков для всех инструментов варьируется в пределах 0,7-0,9 мм.

На следующем этапе проводилось измерение микротвердости поверхностного слоя для каждого из режимов обработки по схеме на рисунке. Размер измеренной области 7\*7 мм.

Далее образцы обрабатывались до размера 55\*10\*10 мм и проводились испытания на ударную вязкость. На фото образец после фрезерования плоскостей и паза. Паз расположен перпендикулярно упрочненной поверхности. Затем производилось шлифование образца.

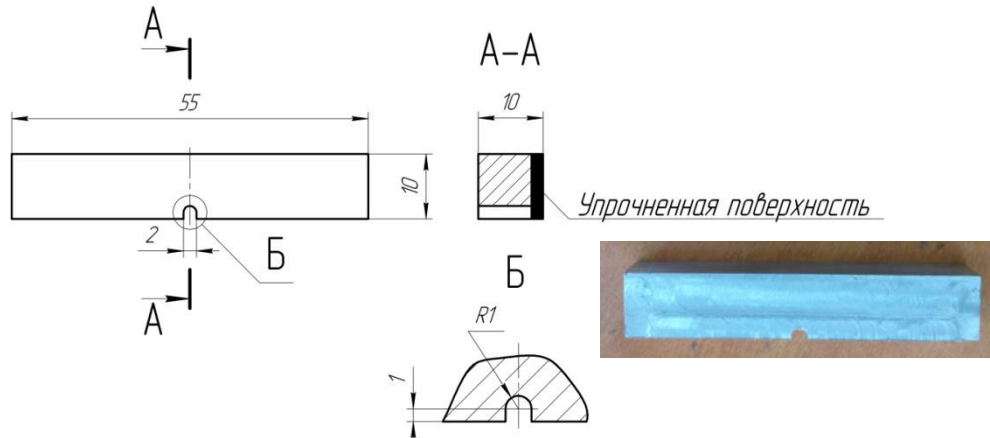


Рисунок 1 – Образец на испытание ударной вязкости

Далее получены результаты твердости и ударной вязкости. Проведено сравнение графиков распределения микротвердости в поверхностном слое по средним значениям, полученных моделированием и экспериментальными исследованиями.

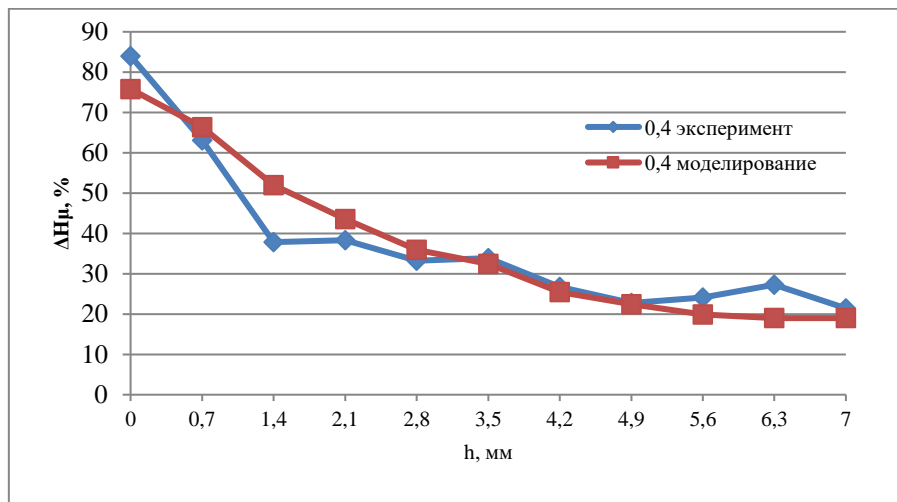


Рисунок 2 – Твердость материала при обработке шаром диаметром 19 мм, K=0,4

Полученные в результате моделирования значения глубины и степени упрочненного слоя можно считать адекватными. Коэффициент объясненной вариации зависимой величины составил 90,77%, что является удовлетворительным значением. Полученные значения можно считать значимыми.

Изменение ударной вязкости оценивалось по отношению к среднему значению ударной вязкости неупрочненных образцов (91,92).

Значительного снижения пластических свойств не обнаружено. Максимальное снижение ударной вязкости составило 11,93%, при этом твердость повысилась в 1,78 раза. Максимальное повышение твердости составило в 2,18 раза, при этом снижение ударной вязкости составило 4,01% (для K=0,6 шаром Ø19 мм).

На основании проведенных экспериментальных исследований предлагается применять упрочнение на следующих трех режимах:

- шарами Ø27 мм и K=0,4+0,6;
- стержнями со сферическим торцом Ø27 мм и K=0,4+0,4;
- стержнями со сферическим торцом Ø27 мм и K=0,4+0,6,

так как данные режимы обеспечивают наибольшую глубину упрочнения, при этом не наблюдается существенное снижение пластичности материала.

Яшков В.А., Панин Н.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: Zirjd@mail.ru*

### **Применение CAE технологий при конструкторско-технологической подготовке производства**

В современных экономических условиях при импортозамещении различных изделий и узлов требуется проводить большой объем инженерных расчетов. Для проведения инженерного анализа актуальным является применение CAE расчетов на основе метода конечных элементов. Рассмотрим инженерный расчет вентилятора системы охлаждения электронных приборов специального назначения. Одним из важнейших требований к нему является габаритные размеры (габаритный диаметр изделия  $\varnothing 40$  мм) и производительность  $70 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

В качестве метода проверки аэродинамических свойств вентилятора был выбран модуль Flow Simulation САПРа SOLIDWORKS, который позволяет моделировать потоки жидкости и газа в условиях реального мира и связанных сил, действующих на компоненты и проходящих через них.

Для проведения инженерного анализа была построена 3D модель изделия и самое главное в нем крыльчатка рисунок 1.

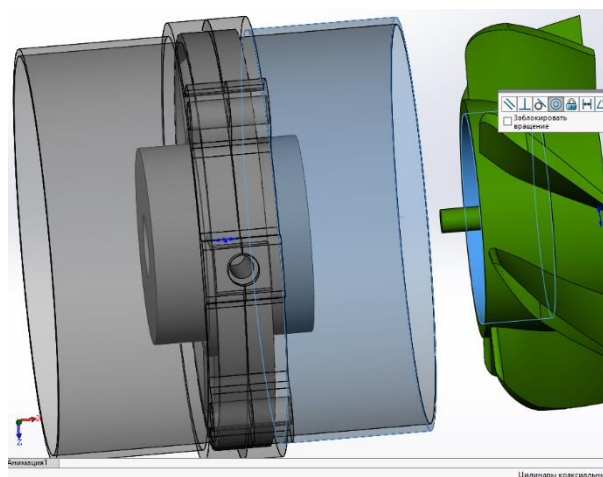


Рисунок 1. 3D модель вентилятора.

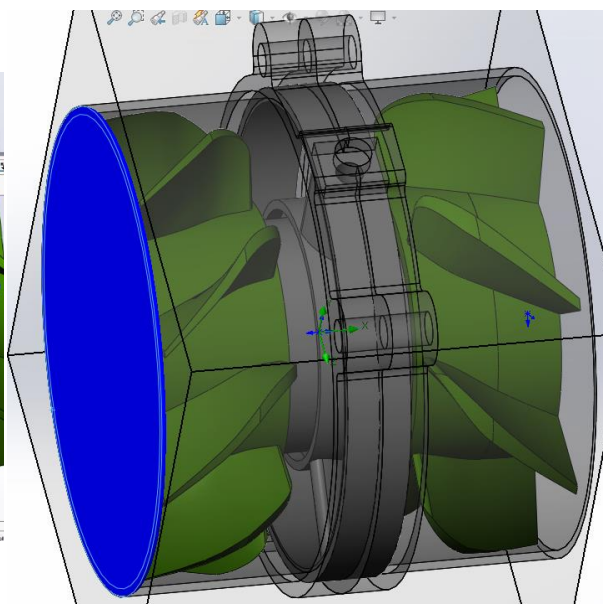


Рисунок 2. Создание заглушек.

На первом этапе создания проекта исследования, задается «исходные условия»: имя проекта, выбирается система единиц измерения (по умолчанию система СИ). Поскольку будет проводиться измерение воздушного потока, создаваемого вращением крыльчаток, выбираем тип задачи «внутренняя» (рис. 3.14). В качестве среды зададим воздух, аналогично среде эксплуатации электровентилятора. (Газы – Предопределённые – Air – Добавить) Когда проект будет создан, модуль Flow Simulation сообщит, что во внутренней задаче внутренний объём должен быть изолирован, а все отверстия должны быть закрыты, и предложит создать заглушки в полуавтоматическом режиме рисунок 2.

На втором этапе задается «граничные условия» открыв вкладку «Добавить граничное условие» в дереве проекта. Задавать граничные условия начнём с определения стенок и скорости вращения крыльчаток. Выберем через дерево сборки крыльчатку 7 лепестков, далее тип-стенка-реальная стенка, выберем движущаяся стенка, и зададим скорость вращения  $20000 \text{ RPM}$ . Аналогичные действия проведём для крыльчатки 9 лепестков за исключением того, что

скорость будет задана отрицательно: -20000 RPM. Последним граничным условием зададим давление на внутренних стенках обеих заглушек рисунок 3.

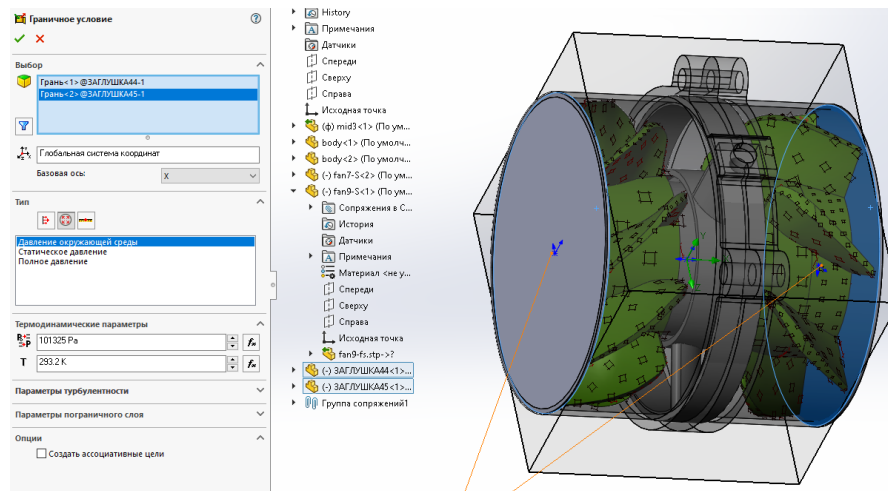


Рисунок 3. Задание граничных условий.

После завершения настройки переменных проекта запускается его расчет, нажав на кнопку «Запустить» на панели Flow Simulation, в появившемся диалоговом окне выберем максимальное количество ядер процессора и нажмём «Запустить». В процессе расчёта будет отобразиться информационное окно с текущей информацией о времени расчёта и количестве итераций, а также предупреждения об ошибках.

Далее выгрузим результаты, нажав на кнопку «загрузить/выгрузить» на панели Flow Simulation. В ветке «результаты-траектория потока» добавим новое измерение для траектории потока. Через дерево модели выберем плоскость «Спереди». В разделе «Представлении» в первой строке выберем «Стрелки», а в четвёртой строке выберем «Скорость». Полученную траекторию потока в сечении можно увидеть на рисунке и определить среднее значение скорости как 11 м/с рисунок 4.

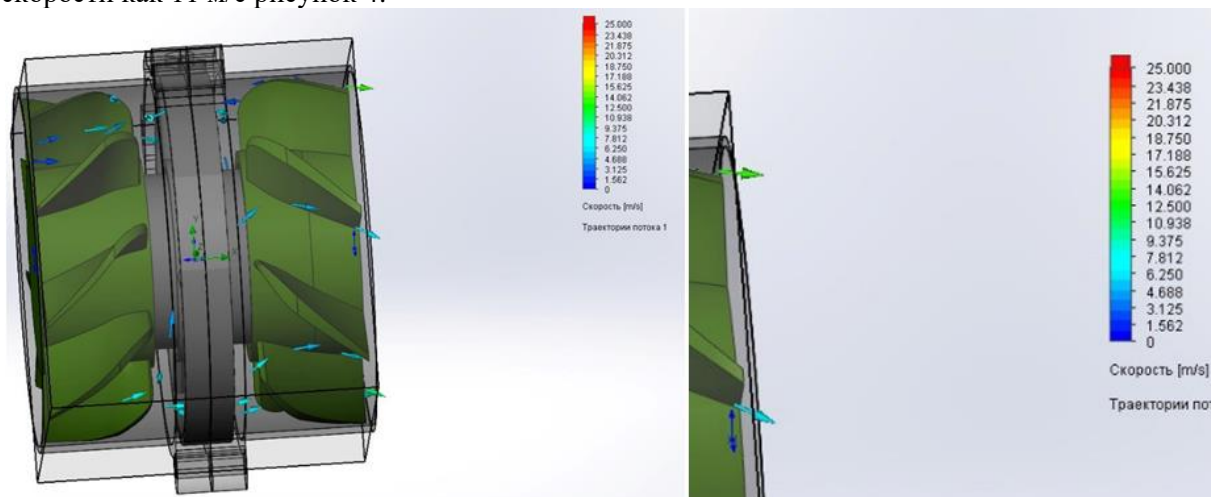


Рисунок 4. Результаты расчета.

Определим номинальную производительность получившейся конструкции при помощи формулы 1.

$$Q = v_i \times S_i \quad (1)$$

где  $v_i$  – средняя скорость в произвольном сечении,  $S_i$  – живое сечение.

Площадь круглого сечения можно вычислить по формуле 2.

$$S_i = S_{окр} = \pi \times r^2 \quad (2)$$

Зная диаметр внутренней поверхности корпуса 0,0508 м, можно определить радиус по формуле 3.

$$r = d/2 \quad (3)$$

Таким образом радиус будет равен 0,0254 м.

$$S_i = \pi \times 0,0254^2 = 0,002027 \text{ м}^2$$

Исходя из цвета маркеров полученной траектории потока, можно определить среднюю скорость как  $v_i = 11 \text{ м/с}$ .

$$Q = 11 \times 0,002027 = 0,022295 \text{ м}^3/\text{с} = 80,26246 \text{ м}^3/\text{ч} \\ \sim 80,26 \text{ м}^3/\text{ч} > 70 \text{ м}^3/\text{ч}$$

В результате расчёта было установлено, что новая крыльчатка имеет запас производительности 14,66%.

Использование современных CAE технологий позволяет существенно сократить время конструкторско-технологической подготовки производства.

Яшков В.А., Яшкова А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: Zirjd@mail.ru*

### Алгоритм проектирования сборного абразивного круга для внутреннего шлифования

Изучение конструкций абразивного инструмента для внутреннего шлифования их достоинств и недостатков показало, что конструкция сборного абразивного инструмента [1] представленного на рисунке 1 обеспечивает большой срок использования инструмента, позволяет повысить эффективность за счет хорошего теплоотвода из зоны резания и расширяют технологические возможности инструмента за счет использования одного инструмента для осуществления черновых, получистовых, чистовых и отделочных видов обработки.

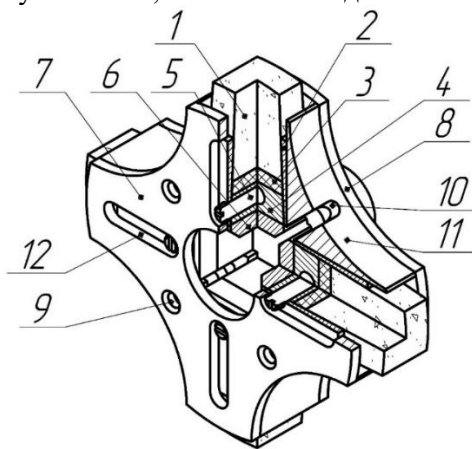


Рисунок 1 – Сборный абразивный круг с радиально подвижными абразивными сегментами

Существует два способа проектирования инструмента: Аналитический, при котором новый инструмент проектируется в результате анализа конкретной детали или изделия; Аналоговый. Когда инструменты предварительно подбираются для определенного класса, типа или группы деталей, или изделий.

Следуя информации из [2], [4], [5], [6], представим алгоритм проектирования собранного шлифовального круга с радиально подвижными сегментами абразивного зерна на рисунке 2.

Алгоритм проектирования представляет собой серию задач по выбору и расчету геометрических и технических критериев в соответствии с требованиями к качеству детали.

Сначала определяется корпусная часть 11 круга в сборе. Диаметр корпуса выбирается исходя из значения диаметра заготовки детали. Размеры оправки для монтажа инструмента в станок, определяются исходя из диаметра корпуса абразивного круга и посадочных размеров в оборудовании. Радиус поверхности корпуса, которая направляет поток охлаждающей жидкости в зону обработки, рассчитывается исходя из диаметра корпуса шлифовального круга и количества установленных абразивных сегментов 1.

После определения части корпуса шлифовального круга разрабатывается рабочая зона. Количество устанавливаемых абразивных сегментов зависит от диаметра круга. Увеличение количества абразивных сегментов увеличивает площадь контакта с поверхностью обрабатываемой заготовки и повышает производительность процесса шлифования. Выбор материала абразивных сегментов, определяется многими факторами, зависящими от требуемых показателей качества обрабатываемой поверхности. Для крепления абразивного сегмента к корпусу круга используется специальная обойма 2. Геометрические размеры обоймы зависят от размеров монтажных пазов, определенных на предыдущем этапе. Абразивный сегмент закрепляется в обойме с помощью штифтов 5, упоров 4 и упругих распорок 3. Для регулировки

силы резания во время шлифования к рабочей части абразивного инструмента крепится дополнительный груз б.



Рисунок 2 – Алгоритм проектирования сборного шлифовального круга с радиально подвижными абразивными сегментами

Для установки сборного шлифовального круга на станке разрабатывают крепежную часть инструмента, представленную. Сборный шлифовальный круг закрепляется на шейке хвостовика определяемой диаметром и ее длиной, зависящей от длины обрабатываемой детали. Установка инструмента в шпиндель станка осуществляется с помощью конуса морзе представленного.

Анализ конструкции сборного абразивного инструмента позволил построить информационную модель шлифовального круга с радиально подвижными сегментами. Модель позволяет наглядно изучить конструкцию и разработать методику (алгоритм) проектирования сборного абразивного круга и влияние его компонентов на получение качественных круглых отверстий с внутренней винтовой поверхностью.

### Литература

1. А.С РФ № 2182531. МПК В24В1/00 Способ внутреннего шлифования / Д.Р. Блурцян. – Б.И., 2000.
2. Проектирование режущего инструмента. Гречишников В.А, Коротков И.А., Схиртладзе А.Г., Горохов В.А. Учебное пособие.- Москва, Сатурн-С 2003 г.
3. Яшков В.А., Гречишников В.А., Албагачиев А.Ю., Исаев А.В., Пивкин П.М., Романов В.Б. Модернизация сборного абразивного круга с радиально-подвижными сегментами для внутреннего шлифования полых деталей роботов // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2015. № 4 (35). С. 8-14.
4. Лашнев С. И. Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1975. – 39 с.
5. Абразивные инструменты для обработки отверстий в деталях робототехнических комплексов Гречишников В.А., Яшков В.А., Пивкин П.М., Романов В.Б., Исаев А.В., Маслов А.Р. СТИН. 2016. № 9. С. 11-14.
6. ABRASIVE TOOLS FOR HOLE MACHINING IN ROBOTIC SYSTEMS Grechishnikov V.A., Yashkov V.A., Pivkin P.M., Romanov V.B., Isaev A.V., Maslov A.P.