

А.В. Киричек, А.Н. Афонин
**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИКО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗЬБ С ПОМОЩЬЮ
МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Одним из наиболее перспективных способов получения резьб является обработка пластическим деформированием – резьбонакатывание. Оно позволяет получать резьбы высокого качества при высокой производительности. Однако, область применения этого прогрессивного способа в настоящее время существенно ограничена. Одной из основных причин ограниченности применения резьбонакатывания является недостаточная степень и глубина упрочнения. Традиционное резьбонакатывание не позволяет, как правило, достичь большой глубины упрочненного слоя (более 1 мм). В то же время, сложный характер нагружения тяжело нагруженных деталей, имеющих резьбы и профили, приводит к тому, что область действия максимальных напряжений при эксплуатации часто находится в глубине детали. Поэтому, в ряде случаев необходима значительная глубина упрочнения (до 0,1...0,2 диаметра резьбы) [2]. К подобным деталям, имеющим ответственные тяжело нагруженные ходовые и крепежные резьбы, относятся детали несоосных винтовых механизмов (НВМ), крепежные детали транспортной и строительной техники, муфты и переводники труб нефтяного сортамента и т.д.

Большая глубина упрочнения (до 8...10 мм и более) при максимальной степени упрочнения до 100% и более может быть достигнута применением статико-импульсной обработки (СИО) [2]. СИО осуществляется в условиях сочетания периодического динамического и постоянного статического воздействия деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность. Динамическое (ударное) воздействие позволяет создавать большие напряжения в пятне контакта инструмента и заготовки при сравнительно небольшой затраченной мощности, а статический поджим способствует более эффективной передаче ударного импульса в обрабатываемую поверхность. Для генерации ударных импульсов при СИО используется гидравлический генератор ударных импульсов [2], отличающийся высоким КПД. Нагружение инструмента с помощью ударной системы, состоящей из бойка и волновода, позволяет формировать импульсы заданной формы, что обеспечивает оптимальные условия для протекания процесса пластической деформации. Глубина упрочнения при СИО может достигать 10 мм и более при степени упрочнения до 100% [2, 4].

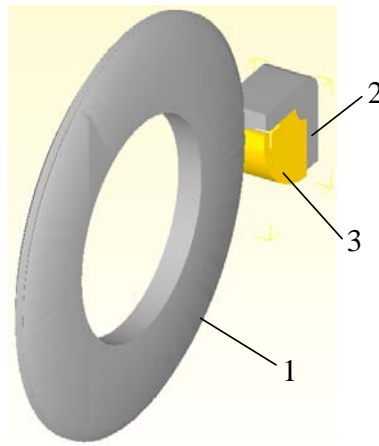
Важной особенностью СИО является возможность формирования поверхностного слоя с гетерогенным упрочнением [3]. Чередование в подобном слое высоко упрочненных твердых участков с менее упрочненными вязкими способствует торможению микротрещин и повышению усталостной прочности материала. Равномерность упрочнения зависит от коэффициента перекрытия отпечатков. При небольших значениях коэффициента перекрытия поверхность получается недостаточно упрочненной, а при слишком больших возникает переупрочнение. Необходимое значение коэффициента перекрытия достигается варьированием частоты деформирующих импульсов и скорости подачи. Проведенные экспериментальные исследования показали, что в ряде случаев рационально выбранное гетерогенное упрочнение может повысить усталостную прочность в 2 и более раза [2, 3].

СИО может успешно применяться как для упрочнения плоских и цилиндрических поверхностей ППД, так и для накатывания резьб, шлицев и других профилей [1, 2]. Имеется успешный опыт применения СИО для упрочнения сердечников крестовин стрелочных переводов, ножей грейдеров и других тяжело нагруженных изделий [2].

Выбор рациональных режимов СИО, особенно при необходимости получения гетерогенно упрочненного поверхностного слоя, вызывает существенные затруднения. Для каждого материала и конфигурации заготовки эти режимы будут различными. Ввиду сложности характера пластической деформации при СИО теоретическое исследование данного процесса аналитическими методами теории пластичности весьма затруднительно. Экспериментальные исследования СИО крайне трудоемки и дорогостоящи. В связи с этим для исследования СИО представляется перспективным использование современных численных методов математического моделирования, в частности метода конечных элементов (МКЭ) [1].

Проведенный анализ современных программных продуктов, реализующих МКЭ (например ANSYS, LS-Dуна, MSC.NASTRAN, QForm и др.), показал, что наиболее предпочтительным для исследования полей напряжений и деформаций при СИО представляется использование мирового лидера в области моделирования процессов обработки давлением и резанием - системы DEFORM 3D [1]. DEFORM 3D позволяет моделировать сложные технологические процессы, в которых взаимодействует большое количество тел со сложной кинематикой их взаимного перемещения.

Для моделирования таких сложных видов обработки, как СИО резьб, важным является задание корректных начальных и граничных условий. Для упрощения задачи и сокращения времени расчета при моделировании резьба представлялась кольцевыми канавками. Расчет производился для одной четверти заготовки. Заготовка при моделировании сохраняет неподвижность, а все движения сообщаются инструменту. Так как к одному инструменту не могут быть одновременно приложены граничные условия в виде сил (деформирующие импульсы и статическое нагружение) и перемещений (движение подачи), для сообщения деформирующих импульсов применяется фиктивный инструмент, имеющий неразрывный контакт с заготовкой (рис. 1).



1 – деформирующий ролик; 2 – фиктивный инструмент; 3 – заготовка
Рис. 1. 3D модель СИО резьб.

При моделировании в DEFORM СИО заготовка принимается идеально пластичной. Механические свойства материала заготовки задаются мультилинейной кривой упрочнения. В качестве критерия разрушения материала используется нормализованный критерий Кокрафта – Лейтема. Инструмент принимается идеально жестким.

Нагрузка, прилагаемая к фиктивному инструменту, является функцией времени и соответствует по своим параметрам реальным пролонгированным деформирующим импульсам гидравлического генератора (рис. 2), имеющим головную и хвостовую части.

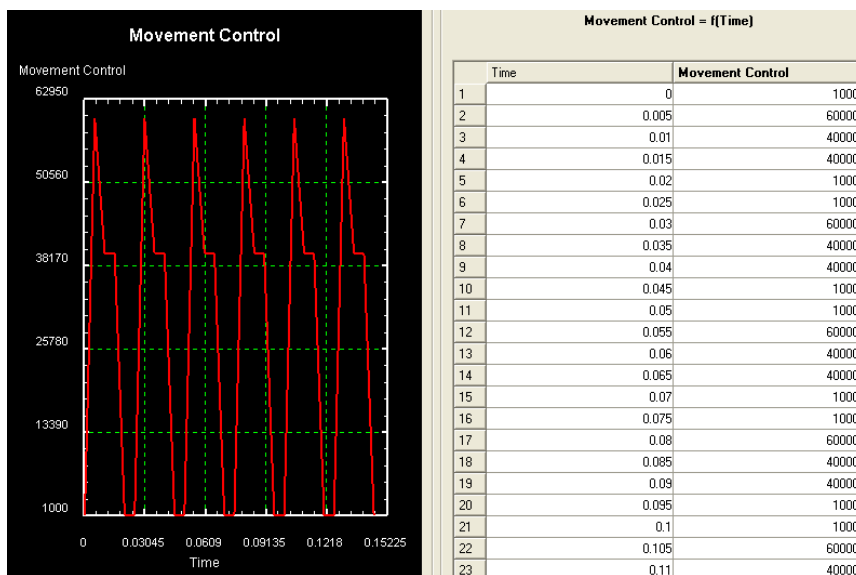


Рис. 2. Нагружение инструмента пролонгированными ударными импульсами.

На рис. 3 приведены поля эквивалентных деформаций в заготовке, полученные при моделировании в DEFORM 3D СИО резьбы М30 на заготовке из стали 45. На рисунке хорошо видна неравномерность упрочнения поверхностного слоя при СИО. Равномерность упрочнения при СИО зависит от коэффициента перекрытия отпечатков [2, 3], получаемых при внедрении инструмента в заготовку под действием единичных импульсов

$$K = 1 - \frac{s}{\delta f 60}$$

где δ - размер отпечатка, мм;

s - скорость подачи, мм/мин;

f - частота деформирующих импульсов, Гц.

На рис. 4 показано распределение эквивалентных деформаций по Мизесу под упрочненной поверхностью на глубине 0,2 мм. Полученные результаты с достаточной степенью точности соответствуют результатам экспериментальных исследований [2 - 4]. Количественно равномерность упрочнения может быть определена по графику, изображенному на рис. 4, используя понятие опорной длины кривой упрочнения (по аналогии с опорной длиной шероховатости поверхности на профилограмме).

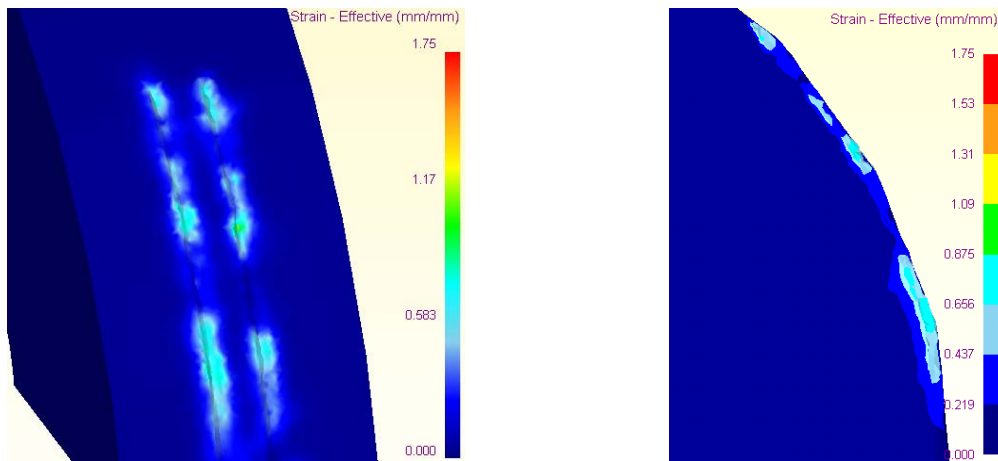


Рис. 3. Эквивалентные деформации при СИО резьб (K=0,5).

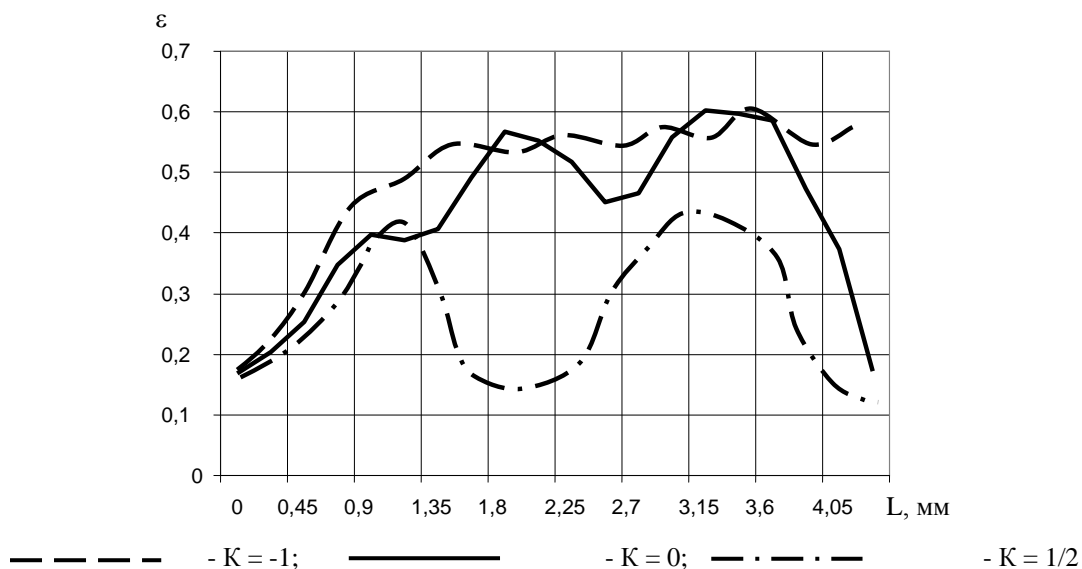


Рис. 4. Распределение эквивалентных деформаций под упрочненной поверхностью.

Моделирование СИО резьб в системе DEFORM 3D позволяет подбирать энергию и частоту деформирующих импульсов и скорость подачи, обеспечивающие требуемую степень, глубину и равномерность упрочнения, без проведения дорогостоящих натуральных экспериментов. Применение компьютерного моделирования позволит существенно расширить область применения СИО и эксплуатационные характеристики тяжело нагруженных ответственных резьбовых деталей.

Литература

1. Киричек А.В., Афонин А.Н. Исследование контактного взаимодействия при накатывании резьб и профилей с динамическим нагружением инструмента // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». 2009. № 2-2/274(560). - С. 72-77.
2. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. - 288 с.
3. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Баринов С.В., Силантьев С.А. // Упрочняющие технологии и покрытия, 2008, №7. – С. 5-8.
4. Сравнение твердости резьбовых профилей, полученных пластическим деформированием различными методами / Д.В. Бушенин, А. В. Киричек, А. Н. Афонин, И. Б. Кульков // Вестник машиностроения, 1999, №10. - С. 40-43.