

МЕХАНИКА

УДК 621.892.:517.9.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ УПРОЧНЕНИИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОКРЫТИЕМ¹**© 2003 А.Л. Берсудский² О.А. Логинов³

Рассмотрены особенности процесса формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при упрочняющей обработке с одновременным нанесением композиционных покрытий. Представлена методика моделирования расчета остаточных напряжений при наличии на поверхности тонкого антифрикционного покрытия с использованием метода конечных элементов.

Введение

Работоспособность агрегатов и узлов машин зависит, в основном, от качества изготовления входящих деталей и состояния их поверхностного слоя, последние направленно формируются на финишных операциях технологического процесса их изготовления [1].

Поверхность и поверхностный слой детали с точки зрения прочности являются ослабленными. Основной причиной этого является то, что атомы на поверхности имеют устойчивые связи только с соседними и нижележащими атомами, и их состояние является неуравновешенным, неустойчивым. По этой причине поверхностный слой обладает свободной энергией и притягивает из окружающей среды влагу, кислород, образуя на поверхности окислы, тем самым ослабляя прочность поверхности. Кроме того, при изготовлении деталей на поверхности возникают различные микродефекты (например, микротрещины), которые при воздействии внешних нагрузок являются концентраторами напряжений.

Разработан ряд методов, позволяющих улучшить состояние поверхностного слоя, в частности большое распространение получили методы поверх-

¹ Представлена доктором физико-математических наук профессором Ю.Н. Радаевым.

² Берсудский Анатолий Леонидович, кафедра строительных дорожных машин и технологии машиностроения Самарской государственной академии путей сообщения. 443010, г. Самара, 1-й Безымянный переулок, 18.

³ Логинов Олег Александрович, кафедра механики сплошных сред Самарского государственного университета. 443011, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

ностного пластического деформирования (ППД). При ППД наряду с упрочнением в поверхностном слое возникают благоприятные остаточные напряжения сжатия, которые оказывают положительное влияние на работоспособность узлов. Однако существует большой класс деталей, где, кроме наличия благоприятных остаточных напряжений в поверхностном слое, рабочие поверхности должны иметь специальные трибологические свойства (рабочие поверхности, зубчатые колеса, детали подвижных соединений ДВС и т.п.).

Одним из таких методов является способ поверхностного упрочнения рабочих поверхностей с одновременным нанесением композиционного покрытия. Варьируя составом композита и технологическими параметрами обработки, возможно, в определенной степени, достичь требуемых параметров качества поверхности рабочих поверхностей [2, 3]. Суть процесса сводится к следующему. Предварительно проводится упрочняющая обработка рабочей поверхности детали деформирующим элементом с целью ее упрочнения, снижения шероховатости, формирования благоприятных остаточных напряжений, активизации поверхности перед нанесением покрытия. Затем в зону обработки вводится спецжидкость, состоящая из солей наносимого металла (например, меди), ацетамида, ультрадисперсных порошков меди, никеля, неметаллов и других компонентов, растворенных в глицерине [4]. Под воздействием статического давления, температуры, деформации происходит процесс осаждения покрытия на поверхность.

При этом предварительно формируется некоторый диффузионный слой, а затем само покрытие. Последующая упрочняющая обработка покрытия улучшает его качество, увеличивает толщину, повышает надежность сцепления покрытия с основой.

Проведенные исследования применения предложенного способа обработки показали, что создание на поверхностях композиционных покрытий и упрочнение поверхностного слоя деталей позволяет снизить коэффициент трения на 20–25%, повысить работоспособность деталей пар трения на 30–35% [5].

1. Моделирование процессов формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при обработке

Процесс обработки сопровождается приложением внешней статической нагрузки, вызывающей упругую, а затем и пластическую деформацию поверхностного слоя. Для области упругой деформации характерно соответствие изменения напряжений и деформаций, распространяющегося в твердом теле с высокой скоростью. Внешнее воздействие сил нарушает равновесие сил взаимодействия атомов, последние смещаются в новые, более устойчивые положения. После снятия нагрузки кристаллическая решетка возвращается к первоначальному состоянию. Увеличение нагрузки вызыва-

ет большую деформацию, и начинается пластическое течение материала. Сдвигообразование в кристаллах представляет собой движение дислокаций по плоскостям скольжения и выход их на поверхность. Пластическая деформация вызывает перемещение имеющихся дислокаций, способствует возникновению новых и затрудняет их выход на поверхность. Возникновение новых дислокаций, перемещение и торможение повышают плотность дислокаций, что приводит к некоторому увеличению объема деформированного слоя, а при сохранении сплошности материала и препятствии этому нижележащих слоев возникают в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия. Во внутренних, нижележащих, слоях — уравнивающие напряжения растяжения. Следует отметить, что при обработке поверхностей методами поверхностного деформирования область расположения максимума остаточных напряжений располагается на некотором расстоянии от поверхности, а на самой поверхности величины напряжений значительно снижаются. В зависимости от конкретных условий обработки статического давления, процессов трения, режимов обработки, теплообразования при деформации, свойств материала детали и инструмента подповерхностный максимум напряжения может располагаться на различных расстояниях от поверхности. Последнее оказывает значительное влияние на работоспособность деталей.

Механизм формирования остаточных напряжений следует рассматривать как приближенную схему взаимодействия деформационных и тепловых процессов. При обработке каждый участок поверхности подвергается многократному воздействию деформирующего элемента, что приводит к дополнительному упрочняющему эффекту. При нанесении покрытия происходит проникновение ионов металла покрытия в поверхность по дислокациям основного материала, что вызывает дополнительное торможение дислокаций, замедляя скорость их перемещений к поверхности. Это несколько снижает уровень деформационного упрочнения (снижение микротвердости), а максимум остаточных напряжений располагается на поверхности, что благоприятно сказывается на работе поверхности в условиях трения. Последующая упрочняющая обработка покрытия методом поверхностного деформирования оказывает положительное воздействие на качество рабочих поверхностей. Следует отметить, что сама спецжидкость снижает температурную напряженность процесса, в первую очередь, за счет лучшего отвода тепла из зоны деформации, снижения трения в зоне контакта деформирующего инструмента и поверхности. Поэтому при реализации предложенного метода обработки основным фактором, влияющим на процесс формирования напряженно-деформирующего состояния поверхности (остаточных напряжений), является силовой фактор.

Моделирование поведения тел, участвующих в процессе обработки ППД, представляет собой достаточно сложную математическую задачу. Происходит это ввиду необходимости рассмотрения в совокупности целого ряда факторов, обусловленных одновременным действием комплекса вза-

имосвязанных физико-механических явлений. Описание контактного взаимодействия твердых тел со сложной реологией с учетом больших деформаций, возникающих в результате процесса обработки, представляет собой основную задачу в представленной работе.

Для решения подобной задачи требуется, наряду с определением граничных условий для тел, участвующих в контактном взаимодействии, задать реологические соотношения для всех материалов, входящих в состав контактирующих тел. В рассматриваемом случае — это материалы ролика, подложки (основной материал) и собственно покрытия.

Реологические соотношения для материала ролика и подложки имеют вид упругопластического материала. Определение реологических соотношений для материала нанесенного слоя (покрытия), который является композиционным, представляется неизмеримо более сложной задачей ввиду отсутствия не только справочных данных о конкретных материалах, но и необходимых методик испытаний для определения констант в реологических моделях. Значения параметров реологической модели для материала покрытия принимались в виде экспертных оценок.

Для моделирования подобных по сложности задач следует использовать численные методы, хорошо развитые и активно используемые в последнее время. При выборе конкретного метода необходимо учитывать не только эффективность самой математической процедуры вычисления, но и возможности самого программного продукта обеспечить должный уровень контроля за проведением расчета и верификационных (тестовых) испытаний.

Всем вышеперечисленным требованиям отвечает пакет для конечноэлементного анализа ANSYS (ANSYS, Inc), который уже в течение четверти века входит в группу мировых лидеров в этой области (NASTRAN, ADAMS, LS-DYNA) и широко используется для расчетов различных конструкций. Для расчета использовалась версия ANSYS 7 (2002 г.).

Построение исследуемой модели соответствовало геометрическим размерам реальной контактной пары. При создании конечноэлементной модели существенное внимание было уделено разбиению области, в которой происходит непосредственное контактное взаимодействие между деформирующим элементом и обрабатываемой поверхностью, поскольку для получения адекватного решения рекомендуется использование конечных элементов, близких по форме к правильным фигурам. В рассматриваемом случае это приводит к необходимости существенного сгущения сетки элементов к поверхности контакта.

При построении геометрической модели было решено использовать двухмерную идеализацию рассматриваемого объекта. При этом число конечных элементов (к.э.) составило около 10 тысяч. Вид конечных элементов разбиения приведен на рис. 1.

Для моделирования процесса к инструменту прилагалась как нагрузка по оси Y (нормальная составляющая), так и сила, действующая при перемещении деформирующего инструмента по поверхности — направление оси

Х. Закрепление производилось заданием нулевых смещений во всех узлах, лежащих на соответствующей поверхности. На рис. 1 представлены только те области конструкции, которые непосредственно участвуют в контактном взаимодействии. Ввиду осевой симметрии для обрабатываемого тела при выборе опции "вид напряженного состояния" активизировался вариант "осесимметричное напряженное состояние". Для деформирующего инструмента выбирался вариант "плоское напряженное состояние".

Зависимость "напряжение~деформация" для материала можно описать билинейным законом. Коэффициент Пуассона принимался равным 0,3. Величина коэффициента трения была определена экспериментальным путем, и его значение принималось в расчете в зависимости от величины нормального давления [5].

Построение конечноэлементной модели проводилось с использованием элементов PLANE 42.

Контактное взаимодействие приводит к значительным неравномерностям в распределении напряжений, что в свою очередь требует построения соответствующей сетки конечных элементов — в зоне с высоким значением градиента напряжений следует генерировать более мелкие конечные элементы. Следует отметить, что все элементы, в том числе и в зоне наибольшего сгущения, имеют форму, близкую к квадрату, что имеет важное значение для сходимости вычислительного процесса.

Моделирование контактного взаимодействия в процессе нагружения проводилось с использованием контактных элементов CONTAC48, CONTAC171, CONTAC172 и TARGET169. Рассматриваемое контактное взаимодействие моделировалось как упругопластическое тело — упругопластическое тело.

Общее количество элементов составило более 5000. Весь процесс компьютерного моделирования занимал 0.5–1.5 часа на Pentium 4. Заданы новые материалы: основной материал — высокопрочная сталь типа ВКС-10, покрытие — композиционный материал (основа — медь с небольшим включением ультрадисперсных порошков меди и никеля). Все свойства уменьшены на 20%.

2. Результаты расчетов полей напряжений при обработке поверхностей

Получено распределение полей напряжений и деформаций, как в текстовой, так и в графической форме. Результаты расчетов напряженно-деформируемого состояния в момент времени сразу после нагружения представлены на рис. 2–4. На рис. 2 приведено распределение вертикальных смещений в зоне контакта. На рис. 3 приведено распределение касательных напряжений, а на рис. 4 приведено распределение нормальных контактных напряжений.

Заключение

Проведенный конечноэлементный анализ для предложенного способа обработки позволяет смоделировать достаточно сложные процессы, происходящие при контактном взаимодействии деформирующего инструмента и обрабатываемой поверхности, что позволит оптимизировать как состав спецжидкости, физико-механические свойства композиционных покрытий, так и технологические режимы обработки.

Экспериментальная проверка показала высокую эффективность метода послойного упрочнения поверхностного слоя рабочих поверхностей с одновременным нанесением покрытия для деталей пар трения агрегатов машин. Выполненные расчеты удовлетворительно коррелируются экспериментальными данными, что подтверждает правильность методики решения задачи.

Литература

- [1] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
- [2] Патент 1838447. Бюл. № 332 от 30.08.93. Способ нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности деталей и устройство для его осуществления /А.Л. Берсудский, Д.Г. Громаковский и др.
- [3] Патент 2053106. Бюл. № 3 от 27.03.96. Способ нанесения защитных покрытий на рабочие поверхности деталей и устройство для его осуществления /А.Л. Берсудский.
- [4] Патент 2103329. Бюл. № 3 от 27.01.98. Смазочно-охлаждающая жидкость для процессов поверхностного деформирования / Г.Д. Мальчиков, Н.С. Малышева, А.Л. Берсудский и др.
- [5] Берсудский А.Л., Алексеев В.И. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств рабочих поверхностей зубчатых колес// Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2002. № 15. Самара: Изд-во СамГТУ. С. 105–111.

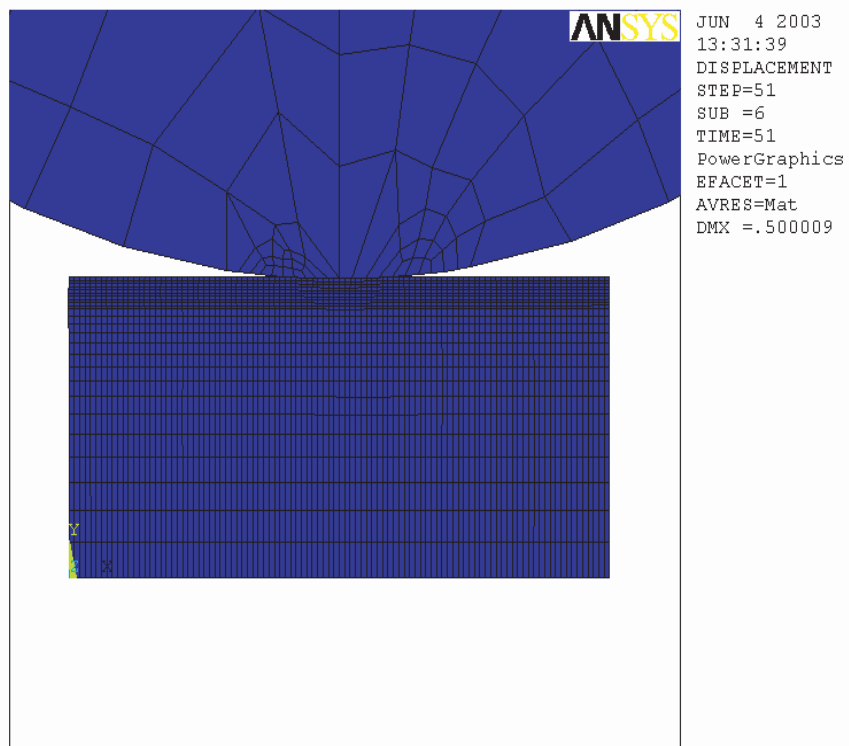


Рис. 1. Деформированное состояние. Вдавливание составляет 0.003 мм

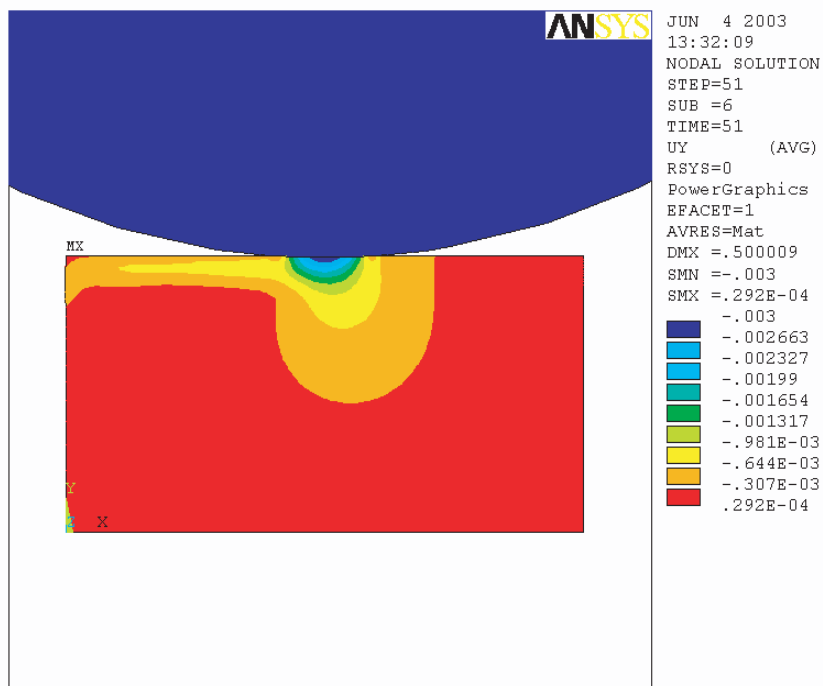


Рис. 2. Вертикальные перемещения в зоне контакта, мм

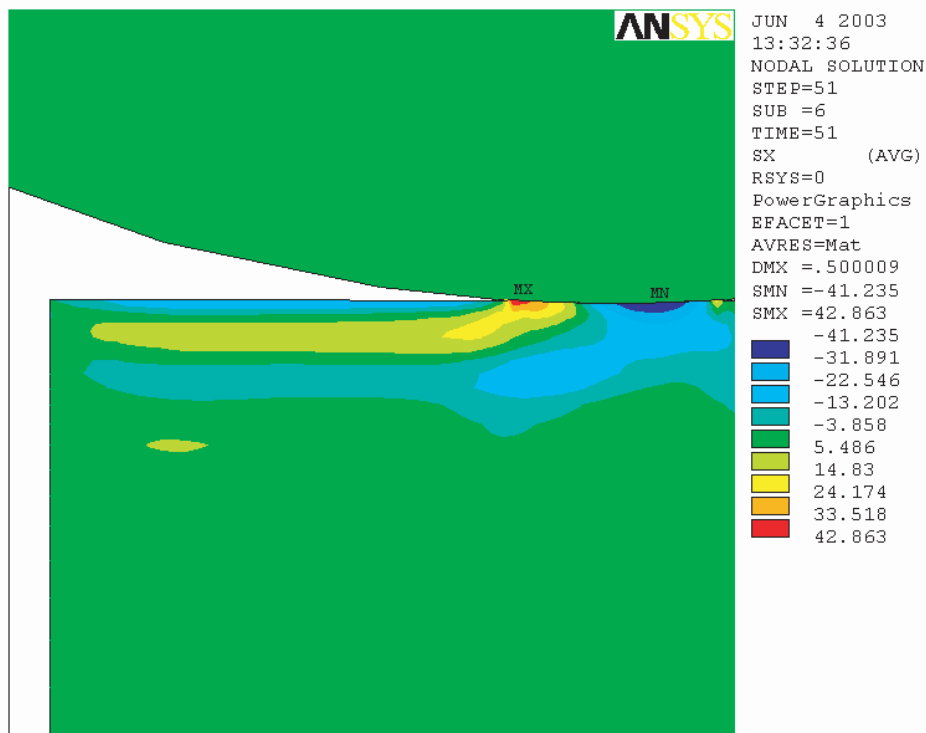


Рис. 3. Касательные напряжения в зоне контакта при обработке, МПа

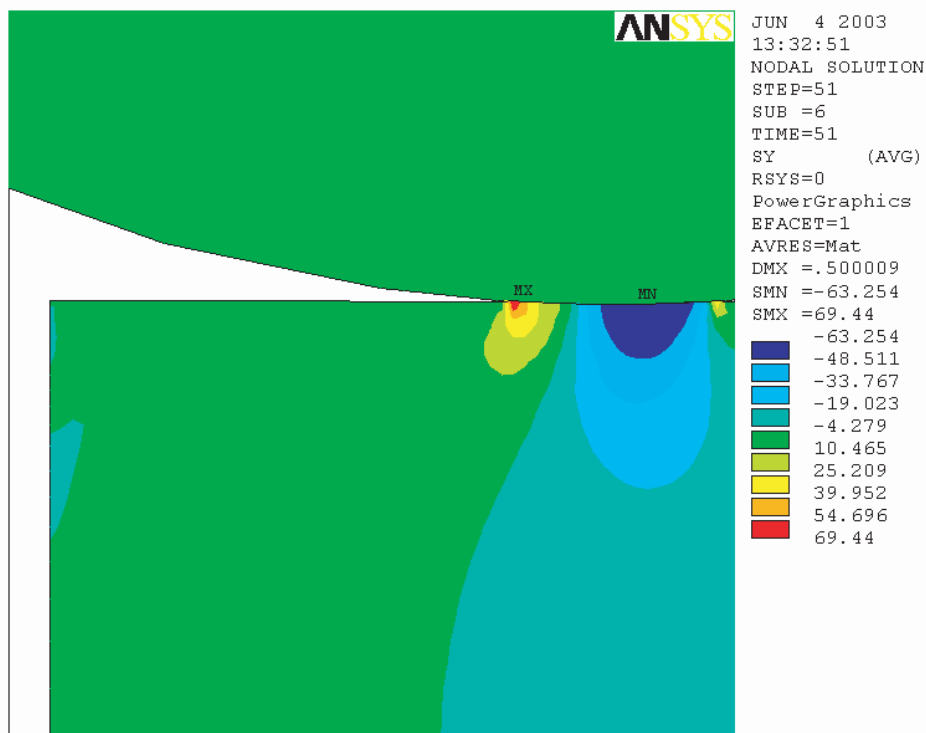


Рис. 4. Распределение нормальных контактных напряжений в зоне контакта, МПа

MODELING STRESS-STRAIN STATE OF A HARDENING SUPERFICIAL LAYER WITH SURFACE COATING⁴

© 2003 A.L. Bersudskij⁵ O.A. Loginov⁶

The process of stress-strain state formation of a superficial layer by hardening with simultaneous composite coating is studied. The method (based on FEM) of modeling residual stresses on a surface with a thin antifrictional coating is given.

Поступила в редакцию 4/VII/2003.

⁴ Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) Prof. Y.N. Radayev.

⁵ Bersudskiy Anatoliy Leonidovich, Dept. of Mechanical Engineering and Road-building Machines, Samara State Transport Academy, Samara, 443010, Russia.

⁶ Loginov Oleg Alexandrovich Dept. of Continuum Mechanics, Samara State University, Samara, 443011, Russia.