

УДК 621.7(078)

Моделирование остаточных напряжений при цементации

С.И. Каратушин, Д.В. Спиридонов, Ю.А. Плешанова

Рассмотрена методика моделирования внутренних напряжений при цементации пластин. Основным исходным параметром является заданное или экспериментально определенное распределение по глубине детали углерода.

Ключевые слова: моделирование, конечные элементы, ANSYS, напряжения, цементация.

The technique of modeling internal stresses during cementation of plates is considered. A basic parameter is a preset or experimentally determined distribution in depth of a carbon part. As an object of research the plate is chosen.

Keywords: modeling, finite elements, ANSYS, stresses, cementation.

Внутренние напряжения (остаточные) в изделиях из металлических конструкционных материалов выполняют очень важную роль [1–3]. Область влияния этих напряжений весьма обширна. В настоящей работе рассматриваются только напряжения, возникающие при упрочнении химико-термической обработкой (ХТО) и, в частности, цементацией. Известно, что ХТО в подавляющем большинстве случаев применяется для повышения износостойкости и контактной прочности. В наибольшей степени от распределения остаточных напряжений зависит контактная прочность. Как правило, очаги разрушения от контактной нагрузки возникают под поверхностью на глубине около 1...2% диаметра тела качения в зоне максимума касательных напряжений. Величина и положение этого максимума зависят от поля внутренних напряжений. Знание эпюр распределения внутренних напряжений позволяет ими управлять посредством изменения режима ХТО. Основной вид разрушения в подшипниках качения — пitting. Из многолетнего опыта следует, что цементованная поверхность обладает большей контактной прочностью, чем классическая шарикоподшипниковая ШХ15. Именно на основании этого ряд иностранных фирм перешел на изготовление колец подшипников качения из цементуемых сталей.

Один из весьма эффективных способов изучения картины распределения остаточных напряжений — моделирование. Именно моделирование позволяет при минимуме экспериментов получить истинную информацию о напряженно-деформированном состоянии. При всех достоинствах методов моделирования существенные успехи в этой области появились только при внедрении метода конечных элементов, и особенно программы ANSYS [4, 5]. Аналитические методы решения задачи напряженно-деформированного состояния цементованной детали даже самой простой формы слишком сложны и неточны для



КАРАТУШИН
Станислав Иванович
доцент кафедры
«Детали машин»



СПИРИДОНОВ
Дмитрий Викторович
старший преподаватель
кафедры «Механики
деформируемого твердого
тела»



ПЛЕШАНОВА
Юлия Андреевна
аспирантка
кафедры «Детали машин»
(БГТУ ВОЕНМЕХ
им. Д.Ф. Устинова)

практических нужд. Материал цементованной детали представляет собой набор марок сталей с разным содержанием углерода и, соответственно, с различными структурами и физико-механическими свойствами. К сожалению, в литературе нет точных данных об удельных объемах мартенсита [6], и особенно для легированных сталей. Именно разность в удельных объемах мартенсита и феррита является причиной возникновения напряженно-деформированного состояния. Если для углеродистой стали зависимость удельного объема мартенсита от содержания углерода известна, то в легированной стали все обстоит значительно сложнее. В легированной стали появляется остаточный аустенит. В цементованном слое остаточный аустенит определяется только рентгеновским методом. Точность метода из-за остаточных напряжений и соответственно размытости диффракционных линий невелика. Остаточный аустенит непосредственно на поверхности и на глубине даже в десятке микрон имеет разное напряженное состояние, а потому, и возможность $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения отличается. О количестве остаточного аустенита в тонком поверхностном слое можно скорее предполагать, чем утверждать. Соответственно такова и информация об удельном объеме фаз в непосредственной близости к поверхности детали.

Таким образом, в цементованной детали достаточно много неизвестных параметров, необходимых для аналитического решения задачи напряженно-деформированного состояния. Для того чтобы свести к минимуму влияние неизвестных параметров принята следующая методика. Плоские образцы $6 \times 16 \times 150$ мм из сталей 20; 20X; 18ХГТ; 20ХН3А цементовались со стороны 16×150 (остальная поверхность покрывалась медью) на глубину 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 мм. После цементации медное покрытие удалялось и химическим анализом с шагом 0,1 мм определялось распределение углерода по глубине. Параллельно градуировался прибор X-RT 804, работающий по принципу измерения электросопротивления. Затем по прибору X-RT 804 оценивалось распределение углерода для выбранных марок сталей. Цемен-

тованные образцы закаливались и отпускались по стандартной технологии. На образцах, прошедших термообработку, измерялся прогиб. Величины прогиба, соответствующие прогибу, нормальные напряжения и распределение углерода по глубине являются исходными данными для определения напряженно-деформированного состояния пластин в программе ANSYS. В работе принято допущение, что удельный объем фаз прямо пропорционален содержанию углерода. По литературным источникам [6] увеличение объема при мартенситном превращении составляет 4...5%.

В ANSYS используется не объемная характеристика расширения мартенсита, а линейная — 1,5%, пересчитанная в усредненный коэффициент линейного расширения, имеющий ту же закономерность изменения по толщине образца, что и концентрация углерода.

На рисунке 1 приведена зависимость усредненного коэффициента линейного расширения и концентрации углерода по толщине образца. Критерием правильности выбора численных значений коэффициентов линейного расширения является прогиб конкретного образца. Качественная картина напряженно-деформированного состояния образца мало зависит от абсолютной величины коэффициентов линейного расширения (в пределах изменения объемного эффекта мартенситного превраще-

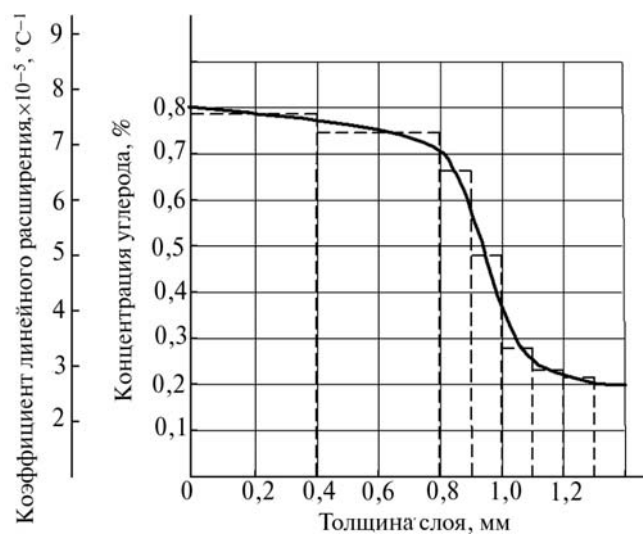


Рис. 1. Зависимость распределения концентраций углерода и коэффициентов линейного расширения по толщине пластины для стали 20X

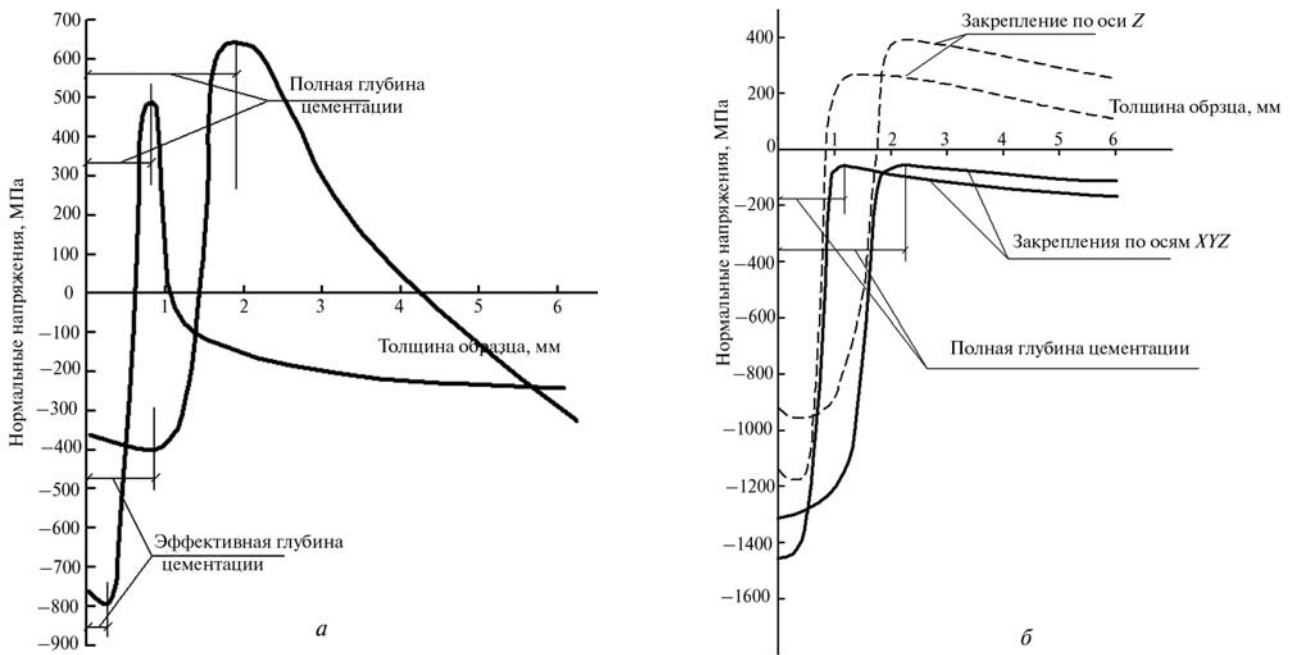


Рис. 2. Результаты расчета внутренних напряжений в ANSYS:

a — в свободном состоянии без закрепления; *б* — с закреплением по плоскости 16×150, противоположной цементованной поверхности (× 10)

ния). Практически подбор коэффициентов линейного расширения сводится к смещению численных значений по оси ординат. Вид графика всегда должен соответствовать распределению углерода по толщине. Модуль нормальной упругости принимается равным $2 \cdot 10^{11}$ МПа; коэффициент Пуассона — 0,3; предел текучести в зависимости от прочности сердцевины цементованной детали от 300 до 1 400 МПа. Распределение концентрации углерода при расчетах берется дискретным: в зоне малых изменений шаг 0,2...0,4 мм; в переходной зоне 0,1 мм (см. рис. 1).

На рисунке 2 представлены характерные результаты расчетов внутренних напряжений для пластины.

Соответствующие фото с монитора приведены на рис. 3.

Модели пластины и изделия других конфигураций создаются в программе Компас 3D V12 и импортируются в ANSYS.

Графики иллюстрируют нормальные напряжения в плоскости, перпендикулярной стороне 16×150 и проходящей через все сечение пластины по центру. Анализ вычислений напряжений на пластинах с разной глубиной цементации показал, что в целом эти результаты не проти-

воречат имеющимся в литературе экспериментальным методам, описанным в [7]. Однако имеются и отличия. Во всех исследованных в работе случаях напряжение непосредственно на поверхности меньше чем в глубине. Это связано не с остаточным аустенитом. Причиной возникновения максимальных напряжений в подповерхностном слое является почти одинаковое содержание углерода в поверхностном и подповерхностном слоях. Соответственно и деформации вследствие насыщения углеродом в этих слоях практически одинаковые. Распределение же полных деформаций по толщине пластины линейное, как при чистом изгибе. В результате деформации, связанные с напряжениями, будут больше не в поверхностном, а в подповерхностном слое. На цементованной и противоположной ей сторонах всегда существуют сжимающие напряжения, область которых разделяет весьма существенная по величине зона растягивающих напряжений. В этой зоне может произойти пластическая деформация с последующей релаксацией напряжений. Спад максимума сжимающих напряжений начинается после уменьшения концентрации углерода ниже 0,7%. Максимум растягивающих напряжений соответствует полной глубине цементации. Выпрямление пластины с после-

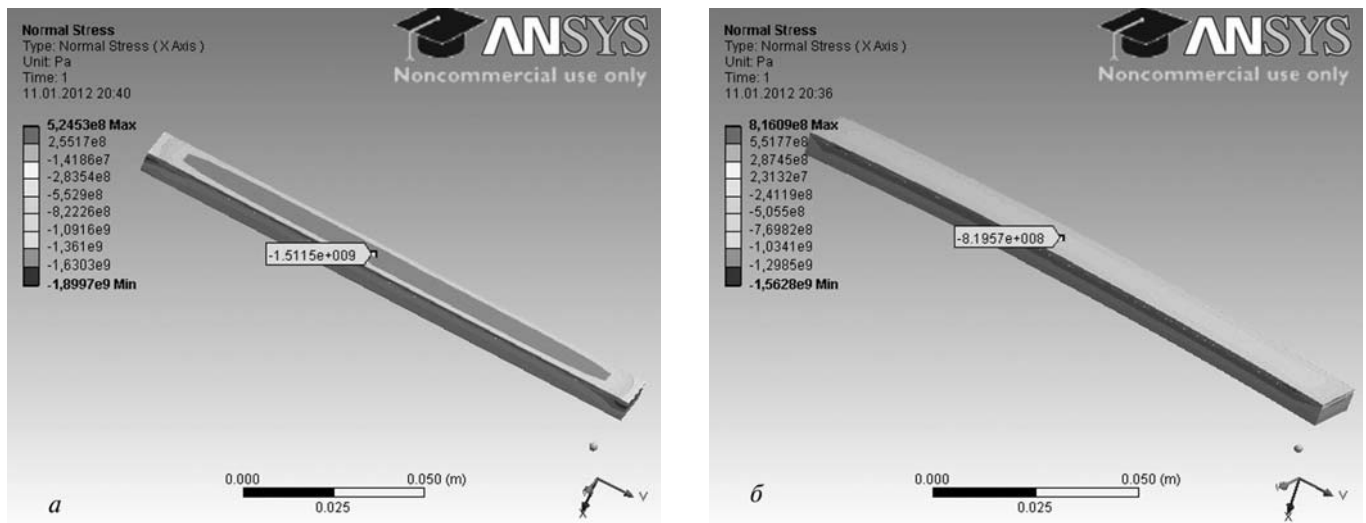


Рис. 3. Распределение внутренних напряжений в пластине по толщине:

a — пластина без закрепления; *б* — пластина с закреплением по плоскости 16 (×150)

дующим закреплением по плоскости 16×150 нецементуемой поверхности резко изменяет напряженное состояние. На рисунке 2, *б* представлены два варианта закрепления: «мягкое» — по оси *Z* и «жесткое» — по осям *X*, *Y*, *Z*. При «мягком» закреплении полные деформации всех слоев одинаковы. Сумма же нормальных напряжений в сечении пластины равна нулю, что соответствует нулевой продольной силе. Поэтому распределение напряжений обратно распределению концентрации углерода по глубине. При «жестком» закреплении полностью исчезает зона растягивающих напряжений. Максимум сжимающих напряжений смещается непосредственно на поверхность и увеличивается примерно в 3 раза. Протяженность зоны по глубине соответствует полной глубине цементации (до концентрации углерода 0,25...0,3%).

Выводы

1. При минимальном количестве экспериментов программный модуль ANSYS позволяет моделировать различные варианты упрочнения поверхности стальных изделий и имитировать нагрузки.

2. Наибольшие сжимающие напряжения достигаются при минимальной глубине цементации.

3. С увеличением глубины цементации уменьшается величина сжимающих напряжений и увеличивается область действия и амплитуда растягивающих напряжений.

4. Моделирование в ANSYS позволяет выбрать оптимальную величину толщины упрочненного слоя с учетом поля напряжений от действия внешних сил.

5. Вопросы моделирования контактной прочности и толщины упрочненного слоя являются темой отдельного исследования.

Литература

1. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения. М.: Наука, 1982. 112 с.
2. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1989. 254 с.
3. Повышение ресурса работы деталей машин и инструмента созданием в них высоких сжимающих напряжений / Н.И. Кобаско, Б.Н. Николин, А.Г. Драчинская и др. // Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение, 1987. № 10. С. 153—157.
4. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. М.: Компьютер Пресс, 2002. 224 с.
5. Огородникова О.М. Конструкционный анализ в среде ANSYS. Изд-во УГТУ. Екатеринбург, 2004.
6. Лысак Л.Н., Николин Б.Н. Физические основы термической обработки стали. Техника. Киев, 1975. 304 с.
7. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.

Статья поступила в редакцию 06.02.2012