

ВЛИЯНИЕ ФИНИШНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ТОПОЛЯНСКИЙ П.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Разработка методов регулирования технологических остаточных напряжений (ОН) в металлах и сплавах является актуальной задачей повышения надежности и долговечности деталей и инструмента. Известно, что ОН, связанные с упругими деформациями, существующими в металле после полного прекращения внешних воздействий, оказывают такое же влияние на материал изделия, как и напряжения, вызываемые эксплуатационной нагрузкой [1, 2, 3].

Опыт эксплуатации изделий, используемых в различных областях техники, и многочисленные эксперименты [4, 5, 6, 7] показывают, что ОН влияют на износостойкость, коррозионную стойкость и в целом на долговечность деталей и инструмента.

Известно, что при всех основных способах нагружения поверхностный слой оказывается в более тяжелых условиях, чем внутренние слои. В поверхностном слое всегда создаются более благоприятные условия для пластического деформирования и разрушения по сравнению с сердцевиной, поскольку здесь имеют место, неуравновешенные атомные связи, облегчен выход дислокаций и вакансий на поверхность, требуется меньше энергии для генерирования дислокаций внешними источниками.

При действии эксплуатационных нагрузок поверхностный слой оказывается также в неблагоприятных условиях, поскольку рабочие напряжения могут складываться с технологическими ОН. Это приводит к принципиальным изменениям напряженности в поверхностном слое, резко возрастают результирующие напряжения, действующие в процессе эксплуатации, полностью меняется эпюра распределения напряжений по сечению детали. В случае действия знакопеременных нагрузок технологические ОН приводят к существенной асимметрии цикла, что, как известно, также отрицательно сказывается на работоспособности детали [3]. Если на поверхности детали имеются растягивающие ОН и в процессе эксплуатации возникают растягивающие или знакопеременные напряжения, то уже в первые часы эксплуатации на поверхности могут образовываться микротрещины, микропоры или может происходить раскрытие уже имеющихся микротрещин, которые при неблагоприятных условиях эксплуатации могут

привести к разрушению детали. Также установлено, что растягивающие ОН на поверхности увеличивают интенсивность процесса коррозии [4].

Остаточные напряжения на поверхности формируются в процессе изготовления деталей за счет различных технологических процессов: механической обработки, литья, термической обработки, обработки давлением, химико-термической обработки, сварки, нанесения покрытий и др. Причиной образования ОН является возникновение зон с различной степенью деформации, например, из-за разнотолщинности изделий, неоднородности химического состава материала, неоднородности нагрева при обработке [8].

Целесообразно технологический процесс изготовления деталей и инструмента организовывать таким образом, чтобы на участках, подвергающихся при эксплуатации наибольшей деформации, были созданы сжимающие ОН, например, с помощью термических, механических, термомеханических и специальных методов обработки.

К известным методам регулирования ОН [9] относятся: низкотемпературный отжиг, поверхностное пластическое деформирование, акусто-механические способы обработки, термоциклическая обработка.

Низкотемпературный отжиг позволяет снизить общий уровень ОН, устранить концентраторы напряжений, стабилизировать структуру металла.

Поверхностное пластическое деформирование [10] обеспечивает создание условий неравномерной деформации, после которой на поверхности возникают значительные сжимающие ОН, уравновешивающиеся расположенными под поверхностным слоем растягивающими ОН, меньшими по абсолютной величине, и распространяющимися на большую толщину в сравнении с сжимающими ОН.

Акусто-механические способы обработки, к которым относятся ультразвуковая и вибрационная обработка, способствуют перераспределению дислокаций и уменьшению их плотности в зонах скопления. Имеется опыт использования ультразвуковой обработки режущего инструмента для создания оптимальных ОН в поверхностном слое для повышения его стойкости в 2-3 раза [11].

Термоциклическая обработка заключается в проведении нескольких циклов нагрева и охлаждения поверхностного слоя. Имеются рекомендации по созданию сжимающих ОН при применении термоциклической обработки инструментальных сталей [12].

Практически все ответственные детали машин, инструмент, технологическая оснастка, подверженные износу, на заключительной стадии изготовления проходят операцию шлифования (заточку). Операция шлифования характеризуется высокими мгновенными температурами в зоне контакта, возникшими в результате массового скоростного микрорезания большим числом абразивных зерен. Практически всегда процесс шлифования приводит к формированию в поверхностном слое деталей ОН растяжения со значительным разбросом их величины [1, 5]. Кроме этого обработка металлов шлифованием приводит к образованию на его поверхности большого количества мелких трещин и других дефектов. Последующее полирование уменьшает шероховатость поверхности и удаляет наиболее мелкие трещины. При этом значительное количество трещин остается в поверхностном слое детали. В процессе полирования их вершины «заваливаются» и не обнаруживаются при контроле деталей внешним осмотром. Кроме того, полирование, проводимое с небольшим съемом материала при малом внешнем усилии обработки, также создает в поверхностном слое изделия растягивающие ОН. Таким образом, в связи с технологической наследственностью на поверхности инструмента и оснастки после их заточки создаются ОН растяжения, которые могут явиться причиной быстрого их износа и разрушения. Для исключения этого явления целесообразно использовать такую финишную операцию (не изменяющую геометрических характеристик изделия), которая позволила бы создать сжимающие ОН на поверхности и тем самым обеспечила повышение усталостной прочности материала [13]. К таким технологическим операциям относятся поверхностное пластическое деформирование и акусто-механические способы воздействия на материал изделия. При этом первый метод не пригоден для режущего инструмента и технологической оснастки (после их заточки) из-за затупления режущих или формирующих кромок и изменения параметров шероховатости поверхности. При акусто-механических методах эти недостатки отсутствуют, но при этом решается только задача создания сжимающих ОН в поверхностном слое.

Разработанный процесс финишного плазменного упрочнения (ФПУ) основан на нанесении при атмосферном давлении тонкопленочного износостойкого покрытия на последней стадии обработки детали или инструмента, то есть он используется в качестве окончательной финишной операции. При этом нагрев изделий при обработке, как правило, не превышает 100°C, что позволяет упрочнять стали с низкой температурой отпуска и не

приводит к деформации деталей. Микротвердость поверхности после ФПУ увеличивается минимум в 1,5 – 2 раза, что обеспечивает ее повышенную сопротивляемость износу. Коэффициент трения покрытия в условиях скольжения по конструкционным сталям снижается более чем в 2 раза, что способствует подавлению процессов наростообразования при резании и налипания при штамповке и прессовании. Наносимое при ФПУ покрытие обладает свойствами диэлектрика и препятствует схватыванию контактируемых поверхностей, а также характеризуется коррозионной стойкостью и жаростойкостью. Параметры шероховатости поверхности после ФПУ не изменяются.

С целью определения влияния процесса ФПУ, как окончательного, на остаточные технологические напряжения в поверхностном слое инструментальных сталей, прошедших механическую, термическую и абразивную обработку были проведены следующие исследования.

Физический механизм возникновения ОН в процессе ФПУ связан с формированием на поверхности изделия тонкопленочного покрытия. В процессе его осаждения возникают напряжения вследствие различия коэффициентов термического расширения материала подложки и конденсата, за счет образования межмолекулярных и химических связей покрытия с основой, микрореологических процессов, связанных с заполнением впадин шероховатости, а также трещин и пор подложки при формировании покрытия.

В качестве образцов использовались пластины размерами 8x80x100 мм, изготовленные из материала Х12М, прошедшие механическую, термическую и абразивную обработки. Условно одна из верхних поверхностей первой пластины разбивалась на две зоны, одна из зон закрывалась маской, а на вторую зону производилось нанесение износостойкого тонкопленочного покрытия методом ФПУ. На второй пластине производилось на одной из половин поверхности обработка плазменной струей без нанесения износостойкого тонкопленочного покрытия. В обоих случаях обработка производилась при предварительном подогреве пластин до 60-80 °С на одном и том же режиме ведения процесса.

Для измерения ОН использовалась аппаратура неразрушающего контроля остаточных и эксплуатационных напряжений в металлах и сплавах – Ситон, которая позволяет определять механические напряжения при измерении амплитудно-фазочастотных характеристик (АФЧХ) [14,15].

Метод измерения АФЧХ напряженно-деформированного состояния объекта основан на изменении электрической

проводимости материала при воздействии на исследуемый участок сигналов переменной частоты и амплитуды. Значения испытательных частот соответствуют глубине проникновения тока в материал изделия. В процессе измерения обеспечивается электрический контакт с участком испытываемой поверхности специального датчика. На вход датчика подается серия тестовых сигналов частотой f_i амплитудой G_i . С выхода датчика принимается и обрабатывается сигнал-отклик амплитудой U_i и разностью фаз Φ_i .

Предпосылкой создания аппаратуры Ситон являлись теоретические и экспериментальные исследования, свидетельствующие о наличии существенной корреляции между параметром деформирующей способности ОН (q) и (АФЧХ) поверхностного слоя металлов и сплавов. ОН определяют путем сравнения АФЧХ испытываемой и тестовой поверхностей (для тестовой поверхности ОН известны). Этим методом определяются не только значения ОН, но и распределение их по глубине поверхностного слоя с учетом скин-эффекта, т. е. функциональной зависимости глубины проникновения в испытываемый материал электромагнитного поля от частоты.

Аппаратура Ситон включает переносной модуль, специальный электроконтактный датчик и персональный компьютер. Число ступеней сканирования для базового исполнения 16. Расчетная погрешность определения механических напряжений 5-10 МПа. База замера 24 - 35 мм. Максимальная глубина определения ОН для сталей 3 мм.

Распределения остаточных напряжений на зоне с исходной технологической наследственностью показаны на рис. 1. Из анализа эпюры напряжений видно, что технологическая наследственность изготовления исходных поверхностей предопределяет получение ОН растяжения на всей глубине исследования. Напряжения подповерхностного максимума составляют + 230 МПа на глубине 80 мкм от поверхности. По направлению к поверхности обеспечивается плавное снижение растягивающих напряжений и на глубине 5 мкм, ОН достигают значения + 50 МПа. Условная экстраполяция кривой эпюры напряжений до нулевой отметки толщины слоя характеризует значение ОН + 30 МПа.

Исследование ОН зоны поверхности упрочненной методом ФПУ показано на рис. 2. Анализ кривой ОН упрочненной поверхности характеризуется точкой перехода ОН из растягивающихся в сжимающиеся. Точка перехода находится на глубине 10 мкм. Экстраполяция указанной кривой до нулевой отметки может привести к значению сжимающих ОН на поверхности равному – 80 МПа.

На рис. 3 и 4 показано распределение остаточных напряжений исходной поверхности пластины и при воздействии плазменной струи без нанесения тонкопленочного покрытия. Из анализа рис. 3 и 4 видно, что воздействие теплового факела плазменной струи на поверхность пластины без нанесения покрытия практически не изменяет знака и распределения остаточных напряжений по сравнению с исходными напряжениями.

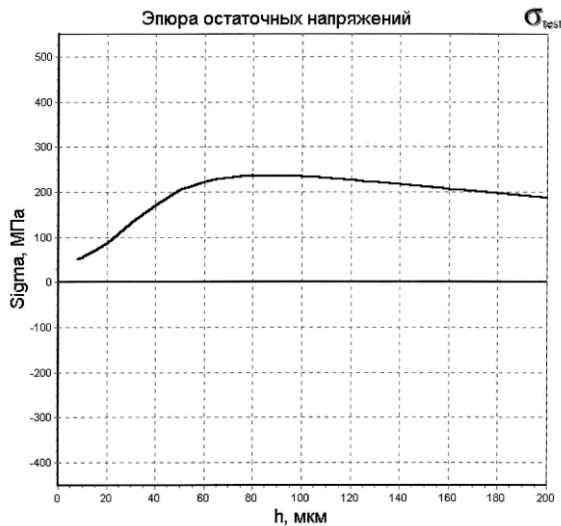


Рис. 1. Эюра ОН на исходной зоне поверхности пластины, где h – глубина залегания ОН

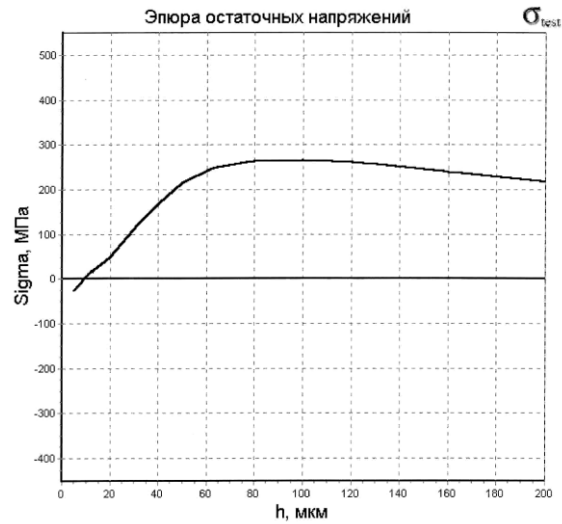


Рис. 2. Эюра ОН на зоне поверхности после ФПУ

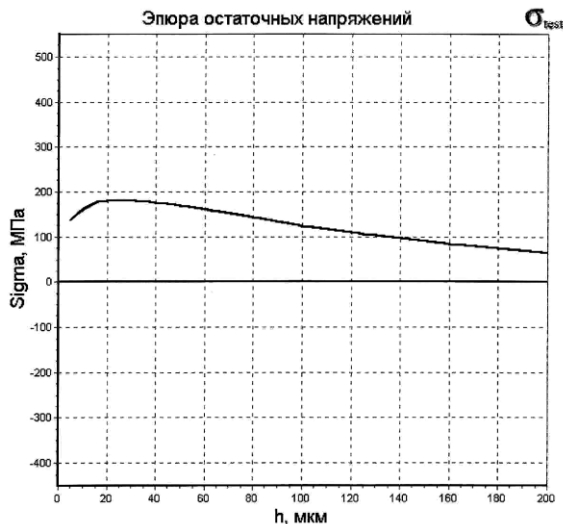


Рис. 3. Эюра ОН исходной пластины

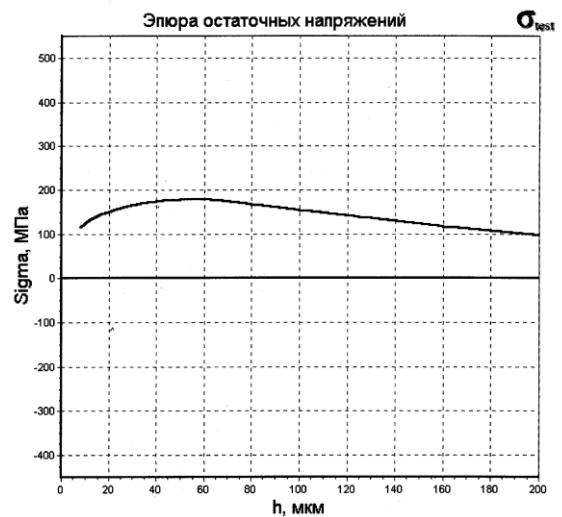


Рис. 4. Эюра ОН на зоне пластины обработанной плазменной струей без нанесения тонкопленочного покрытия

Таким образом, основной вклад в изменение и создание благоприятных сжимающих ОН на поверхности изделий при ФПУ

вносит наносимое тонкопленочное износостойкое покрытие. Данный метод может быть рекомендован как окончательный финишный процесс обработки поверхностей, работающих в условиях трения и износа, препятствующий распространению трещин и повышающий усталостную прочность.

Литература

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машиностроение. 1963. - 252 с.
2. Подзей А.В., Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Технологические остаточные напряжения. М.: Машиностроение. 1973. - 216 с.
3. Подзеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения: теория и приложения. – М.: Наука. 1982. - 112 с.
4. Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М. Машгиз, 1962. - 126 с.
5. Маталин А.А. Технология машиностроения. Л., Машиностроение, 1985. - 496 с.
6. Алехин В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М., Наука, 1980. - 280 с.
7. Алексеев П.Г. Устойчивость остаточных напряжений и их влияние на износостойкость деталей, упрочненных наклепом. «Повышение эксплуатационных свойств деталей с поверхностным пластическим деформированием», М., МДНТП, 1971. - с. 76-79
8. Хенкин М.Л., Локшин И.Х. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении. М., Машиностроение., 1974, 254 с.
9. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М., Металлургия, 1989. - 254 с.
10. Кудрявцев И.В. Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин. М., Машиностроение, 1969, 100 с.
11. Способ обработки режущего инструмента. Биронт В.С., Сущих В.А. А.с. СССР 836134, МКИ С21Д, 1/04, БИ.1981, №21. с.136
12. Геллер Ю.А., Басурина И.А. Повышение стабильности размеров инструмента и деталей путем термообработки Станки и инструмент, 1966, №2. - с.33-34
13. Кобаско Н.И., Николин Б.И., Драчинская А.Г. и др. Повышение ресурса работы деталей машин и инструмента созданием в них высоких сжимающих напряжений. Известия ВУЗов. Сер. Машиностроение, 1987, №10. - с. 153-157
14. Иванов С.Ю, Прима В.И. Измерительно - вычислительный комплекс скан-идентификации технологических остаточных напряжений. Тяжелое машиностроение, 1995, № 12. - с 14-17