

ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

629.735.015.4: 539.219.2

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНО НАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО КРИТЕРИЮ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Канд. техн. наук Г.М. РЫБАКОВ

Дано описание нового алгоритма, который моделирует изменение пластической деформации в поверхностном слое детали в течение обработки дробью и обладает возможностью получать заданные параметры кривизны металлических панелей. Данный алгоритм непрерывно совершенствуется.

This paper describes a new algorithm. This algorithm simulates the change in plastic deformation in the surface layer of a part in the process of shot peening, and provides the given parameters of curvature of metal panels. The author is continuously working on perfecting the algorithm.

До настоящего времени не найдены закономерности, которые позволили бы описать механизм наведения ОН аналитическими зависимостями. Поэтому определение ОН производят эмпирически, вырезая образцы из обработанных деталей и определяя ОН разрушающим методом Давиденкова [1—3].

Основная трудность использования этого метода заключается в отсутствии метрологического обеспечения, поскольку не существует поверочных средств оценки напряжений, действующих во внутреннем объеме материала. В частности, образцы, вырезаемые из деталей после дробеструйной обработки (ДО), выгибаются выпуклостью в сторону обработанной поверхности. Этот прогиб или выгиб, являющийся проявлением внутренних напряжений, следует определять на постоянном базовом размере для всех исследуемых образцов. Однако в практике применения метода Давиденкова базовый размер, относительно которого измеряют прогиб, не учитывается. При определении ОН образцы, имеющие одинаковый прогиб и разную длину (рис. 1), показывают, естественно, разное распределение напряжений. Но из-за отсутствия четких метрологических правил при использовании метода Давиденкова, можно прийти к выводу о том, что одинаковые прогибы, полученные при ДО, могут быть вызваны различным распределением остаточных напряжений. Проанализируем, как это происходит на практике, рассмотрев известную формулу для определения остаточных напряжений методом Давиденкова [3]:

$$\sigma(a) = \frac{4E}{3L^2} \left[(h-a)^2 \frac{df}{da} - 4(h-a)f + 2 \int_0^a f(\xi) d\xi \right],$$

где f — текущий прогиб образца, меняющийся в процессе травления, L — длина сравливаемого слоя. Для сравниваемых образцов разной длины, показанных на рис. 1, в формулу подставляют длину L_1 или L_2 и прогиб $f_1 = f_2$. После таких подстановок в формулу заложена неоднозначность напряжений для разных образцов с «одинаковым» прогибом.

Такая неточность присутствует во всех публикациях и методиках по определению ОН методом Давиденкова. В частности, в [4] показано, что изгиб образца, вырезанного из материала после механической обработки, не связан с фиксированным значением базового размера. Основываясь на неточных данных исследователи заключают, что даже при неизменных свойствах обрабатываемого материала, толщинах и прогибах вырезаемых образцов и отсутствии каких-либо отклонений в процессе ДО, остаточные напряжения в поверхностном слое могут оказаться различными. В связи с этим возникает вопрос – а можно ли вообще контролировать стабильность процесса ДО, по критерию ОН, если нет однозначных закономерностей их появления? Отсутствие четких метрологических требований при применении метода Давиденкова в конечном итоге приводит к разрушению годных деталей с целью контроля ОН, которое ни технически, ни экономически не обосновано.

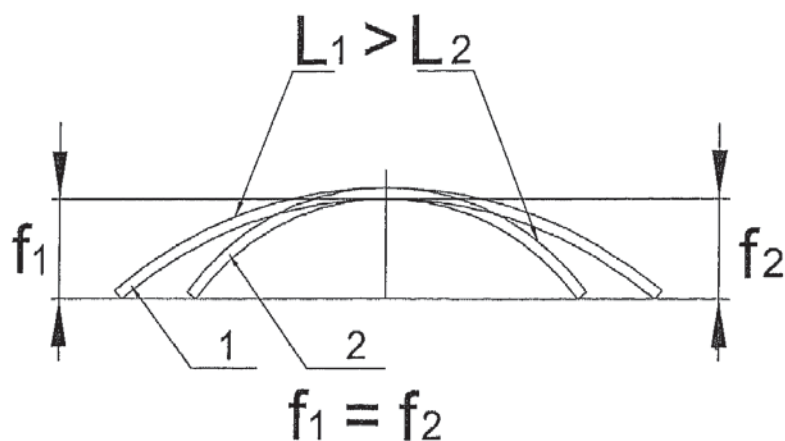


Рис. 1. Получение исходных данных для определения остаточных напряжений в образцах с одинаковым прогибом

Существующие представления о возникновении остаточных напряжений не дают возможности вывести аналитическую зависимость, описывающую механизм наведения ОН в деталях при ДО. Так в [4] существенной считается только та часть ОН, которая распространяется от поверхности до точки перехода через ноль. Поэтому величина прогиба вырезанного образца не связана никакой аналитической зависимостью с распределением напряжений по всему сечению образца. Отсюда логически следует неоднозначная зависимость прогиба от распределения ОН в поверхностном слое. Следуя логике [4] и варьируя только площадью эпюры в поверхностном слое, можно получить бесконечное множество «одинаковых площадей» эпюр, которые, как считается, создают одинаковые условия изгиба образца постоянного сечения. Подобное искусственное выделение части ОН некорректно, поскольку весь материал детали (или образца) реагирует на любое изменение в поверхностном слое. Исследования, опубликованные в конце 80-х годов фирмой Metal Improvement Co. USA, показывают, что у разных материалов существует не только однозначная, но прямо пропорциональная зависимость прогиба от глубины наклепа при ДО [5]. Эти исследования свидетельствуют об однозначной зависимости распределения ОН от прогиба образца.

Более корректное, с точки зрения метрологического обеспечения, определение ОН методом Давиденкова наглядно показано на рис. 2. Образцы разной длины, одинаковой толщины и с «одинаковым» прогибом устанавливаются на единый базовый размер, относительно которого измеряют прогиб. Измерение прогибов образцов разной длины относительно еди-

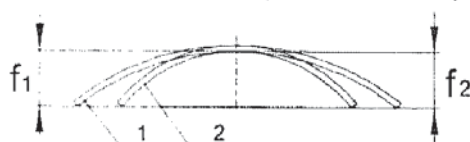
ного базового размера показывает, что в действительности образцы имеют разный прогиб, причем образец меньшей длины имеет больший прогиб относительно базового размера (рис. 2). В соответствии с известными классическими представлениями [1], образец с большим прогибом обработан более интенсивно, имеет большую глубину наклепа и соответствующее распределение напряжений. Неоднозначность распределения напряжений при этом полностью исключается. При измерении относительно постоянной базы получаем $L_1 \approx L_2$, а $f_2 > f_1$ и ОН по классической формуле однозначно определяются величиной прогиба.

Многолетние исследования, проведенные нами в области управления процессом ДО, позволили разработать метод определения ОН, исключая метод Давиденкова. Названный алгоритм Рыбакова или экспресс-метод, позволяет, используя предел текучести и модуль упругости материала образца, толщину и прогиб образца, измеренные на строго установленной базе, определить ОН после ДО.

Метод описывает механизм наведения ОН по глубине материала при ДО аналитическими зависимостями. Аналитическая зависимость, описывающая распределение напряжений по всему сечению образца как функцию от его прогиба, получена нетривиальным способом. Решение основано на анализе равновесия пластины, изогнутой под действием ДО [6]. Для описания равновесия использована известная задача внецентренного растяжения или сжатия стержней прямоугольного сечения [7]. На рис. 3 показаны три случая внецентренного растяжения (сжатия) для различных точек приложения внецентренных нагрузок к стержню прямоугольного сечения. Из рис. видно, что при увеличении эксцентриситета e (т.е. координаты точки внецентренного приложения силы) эпюра напряжений приближается к симметричной, а при $e \rightarrow \infty$ становится практически симметричной. Для решения нашей задачи важны два состояния, характеризуемые значениями эксцентриситетов: $\frac{b}{6} < e < \frac{b}{2}$ и $\frac{b}{2} < e < \infty$. Синтезируем условие равновесия изогнутой ДО пластины.

тетов: $\frac{b}{6} < e < \frac{b}{2}$ и $\frac{b}{2} < e < \infty$. Синтезируем условие равновесия изогнутой ДО пластины.

Некорректное определение прогиба



Метрологически обоснованное измерение прогиба

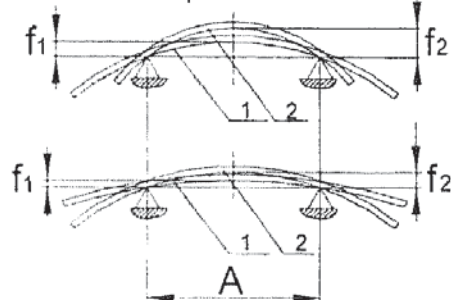


Рис. 2. Метрологически обоснованное получение исходных данных для определения остаточных напряжений

Равновесие стержня, характеризуемого условием $\frac{b}{6} < e < \frac{b}{2}$, относится к пластически деформированному слою, а условие $\frac{b}{2} < e < \infty$ — к упруго деформированному. В соответствии с классической задачей внецентренного растяжения или сжатия равновесие упруго и пластически деформированных слоев определяется при наличии жесткой заделки, как показано на рис. 4.

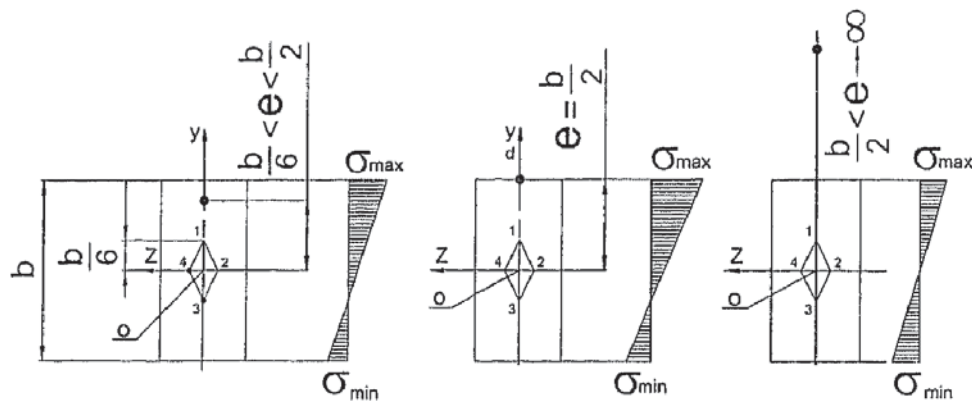


Рис. 3. Динамика изменения напряжений по сечению стержня прямоугольного сечения при изменении точки внецентренного приложения силы

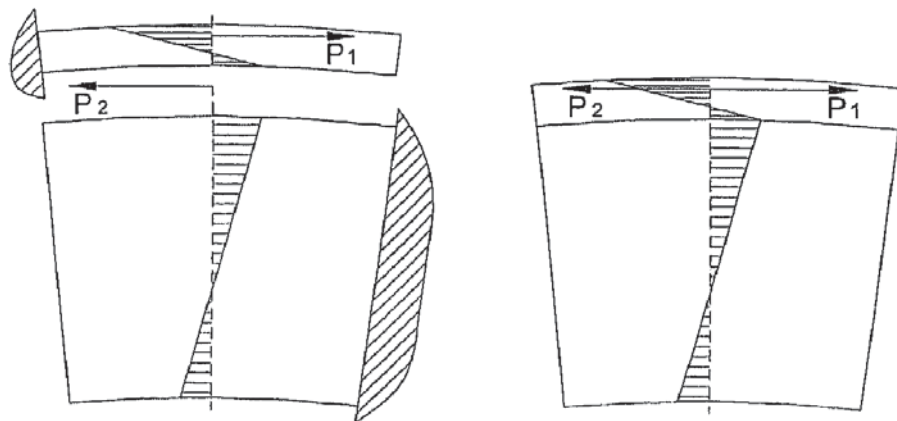


Рис. 4. Равновесие пластически и упруго деформированных слоев при взаимодействии с жесткой заделкой

Заменяя равновесие слоев, обеспечиваемое жесткой заделкой, на равновесие, обеспечиваемое воздействием одного слоя на другой, приходим к схеме, изображенной на рис. 5, где пластически деформированный и упруго сжатый в условиях изгиба слой толщиной X воздействует с силой P_1 на упруго растянутый в условиях изгиба слой материала, толщиной $(H-X)$. В свою очередь, последний воздействует на пластически деформированный слой толщиной X с силой P_2 . Условием равновесия изогнутой ДО пластины является равенство модулей сил $|P_1| = |P_2|$. Силы P_1 и P_2 определяются распределением напряжений, возникающих при внецентренном растяжении или сжатии пластически и упруго деформированных слоев. При известных геометрических размерах образца и физико-механических свойствах материала, распределение напряжений по всему сечению материала образца после ДО однозначно определяется по одному параметру — прогибу образца, измеренному на определенном базовом размере.

Для расчетов напряжений разработана программа для ЭВМ, содержащая алгоритм многофункционального назначения [8]. В частности, алгоритм может быть использован для расчета остаточных напряжений после ДО.

Элементарный объем пластины в состоянии равновесия характеризуется параметрами, представленными ниже.

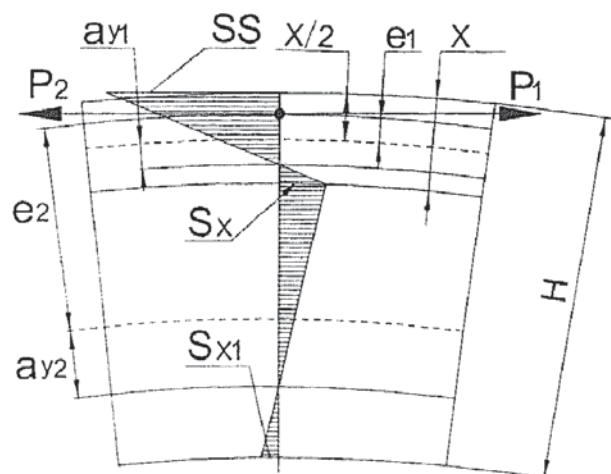


Рис. 5. Условие равновесия изогнутой ДО пластины

H — толщина пластины, X — толщина пластически деформированного слоя. Сила P_1 представляет собой реакцию упруго сжатого пластически деформированного слоя, противодействующую его сжатию. Упруго деформированный слой воздействует с силой P_2 на пластически деформированный, вызывая его упругое сжатие. В состоянии равновесия модули сил P_1 и P_2 равны. Координаты точек приложения сил P_1 и P_2 неодинаковы относительно нейтральных и средних линий упруго и пластически деформированных слоев: так, e_1 — эксцентриситет или координата точки приложения силы P_1 относительно центра тяжести прямоугольного сечения стержня или относительно осевой линии пластически деформированного слоя; a_{y1} — расстояние от оси симметрии пластически деформированного слоя до его нейтральной оси, на которой напряжения сжатия приобретают нулевые значения; e_2 — эксцентриситет или координата точки приложения силы P_2 относительно центра тяжести прямоугольного сечения стержня или относительно осевой линии упруго деформированного слоя; a_{y2} — расстояние от оси симметрии упруго деформированного слоя до его нейтральной оси, на которой напряжения приобретают нулевые значения; SS — сжимающие напряжения, возникающие на поверхности пластины в состоянии, когда упруго и пластически деформированные слои находятся в равновесии. В соответствии со стандартами, принятыми в международной практике, буквы SS являются начальными буквами слов *Surface Stress* (поверхностные напряжения) — напряжения, определяемые на поверхности материала детали; s_x — растягивающие напряжения, возникающие на границе перехода от пластически к упруго деформированному слою; s_{x1} — сжимающие напряжения, возникающие в состоянии равновесия на вогнутой стороне пластины, противоположной стороне, обрабатываемой дробью.

Полученное решение является нетривиальным, поскольку определение глубины пластически деформированного слоя основано не на задачах пластического течения, а на классической задаче теории упругости. Существенное следствие этого решения: остаточными напряжениями следует считать распределение напряжений по всему сечению или объему образца (детали).

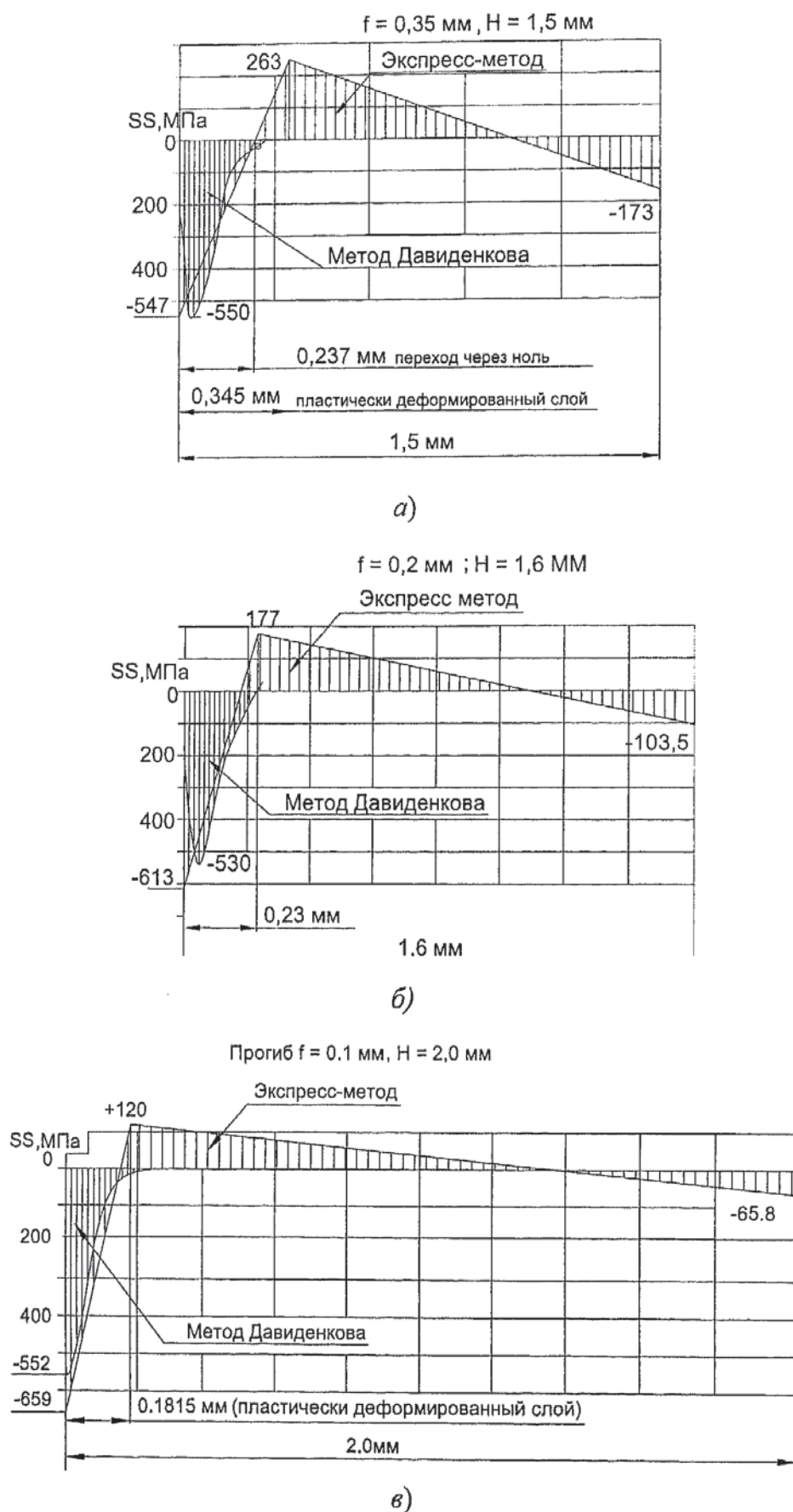


Рис. 6. Распределение напряжений в образце, толщина образца H , мм: а — 1,5; б — 1,6; в — 2,0; глубина f , мм: а — 0,35; б — 0,2; в — 0,1, полученное экспресс-методом и методом Давиденкова

Расчет распределения остаточных напряжений основан на четкой метрологической основе, как показано на рис. 2. Постоянная база измерения прогибов пластин приводит к сопоставимости результатов измерений прогибов и исключает неоднозначность определения ОН.

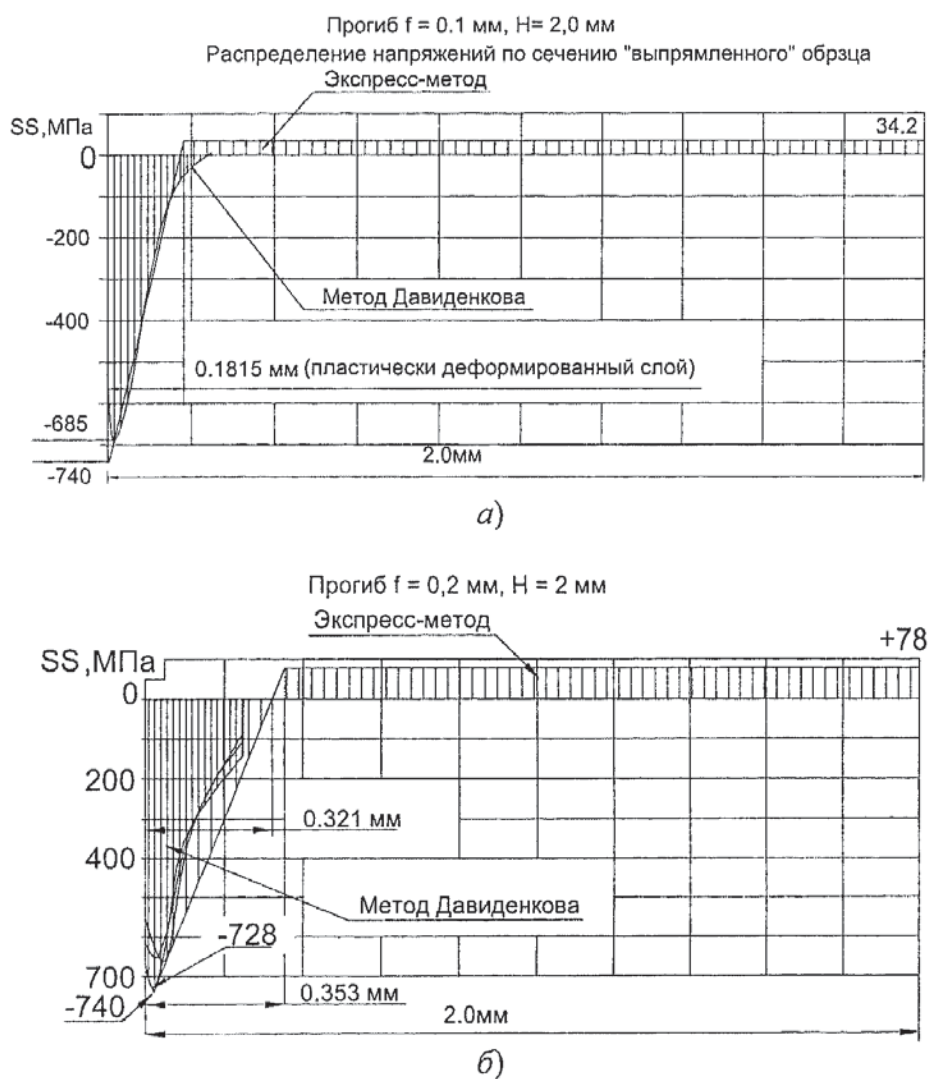


Рис. 7. Распределение напряжений, полученные экспресс-методом и методом Давиденкова при «выпрямленном» образце

Представленный способ не требует специального оборудования и сложной технологии стравливания поверхностных слоев в электролите при непрерывном измерении прогиба и представляет собой экспресс-метод определения остаточных напряжений. Представляемый экспресс-метод позволяет организовать неразрушающий контроль сложно нагруженных дорогостоящих деталей. Для этого используются образцы-свидетели, располагаемые на поверхности технологической детали в процессе ДО. Эти «не вырезаемые из детали» образцы можно использовать для определения ОН только по одному параметру – прогибу образцов.

Для оценки достоверности представленного метода проведен комплекс исследований, включавший сравнение экспресс-метода и традиционного метода Давиденкова. Образцы для контроля размером $40 \times 4 \times 2$ мм вырезались из готовой детали. После вырезки измерялись получившиеся размеры и прогиб на определенной постоянной базе измерения,

как показано на рис. 2. Некоторые результаты сравнения двух методов определения ОН представлены на рис. 6—7.

Как видно из представленных данных, оба метода дают практически совпадающие результаты в области от максимальных значений ОН на поверхности до точки перехода напряжений сжатия через ноль. Однако экспресс-метод более информативен, поскольку дает представление о распределении напряжений по всему сечению образца. При этом метод моделирует распределение напряжений в материале детали до вырезки, т.е. в состоянии после ДО.

Следует иметь в виду, что экспресс-метод имеет существенные ограничения, поскольку необходимым условием является наличие прогиба образца. Метод применим только для определения ОН после ДО и для материалов с неизменными прочностными характеристиками по объему. Поэтому с помощью метода невозможно определить растягивающие остаточные напряжения, так как их появление связано с изменением свойств материала по глубине, возникающих, например, при шлифовании.

Выводы

Исследование показало, что часть остаточных напряжений сжатия, возникающих в приповерхностном слое после ДО, неразрывно связана в единую систему распределения напряжений по всему сечению или объему образца (детали). За остаточные напряжения после пластической деформации поверхностного слоя следует принимать распределение напряжений по всему сечению или объему детали.

Как при классическом способе Давиденкова, так и при экспресс-методе следует определять прогиб относительно единого базового размера, исключая неоднозначность определения остаточных напряжений.

Экспресс-метод может быть использован как неразрушающий для контроля стабильности ДО сложно нагруженных деталей. При этом существенно повышается надежность контроля технологии дробеструйной обработки.

Метод применим только для ДО материалов с неизменными прочностными характеристиками по объему. Поэтому не может быть использован для определения растягивающих остаточных напряжений, так как их появление вызвано изменением свойств материала по глубине, например, градиентом температур при шлифовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Almen J. O., Peening Surfaces Improve Endurance of Machine Parts, Metal Progress, 43 (February 1943). — P. 209—217.
2. Давиденков Н. Н. Динамические испытания металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1936. — 395 с.
3. Сулима А. М., Евстигнеев М. И. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов. — М.: Машиностроение, 1974. — 256 с.
4. Овсеенко А. Н. и др. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. — М.: СТАНКИН, 2003. — С. 61—64.
5. Brodrik R. F. Protective Shot Peening of Propellers, WRIGHT AIR DEVELOPMENT CENTER, Technical Report 55-56, Part I, II, III. February 1985.
6. Рыбаков Г. М. Фундаментальные основы управления качеством дробеструйной обработки деталей машиностроения. Сообщение 3. Разработка «предсказывающей функции» // Известия вузов. Машиностроение, 2006. — № 3. — С. 47—52.
7. Белыев Н. М. Сопротивление материалов. — М.: Государственное издание технико-теоретической литературы, 1954. — 856 с.
8. Рыбаков Г. М. Программа, содержащая алгоритм управления качеством дробеструйной обработки металлических деталей, работающих в условиях сложного нагружения / Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. — 2005. — № 4. — 204 с.