

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.163.3:531.781

ОЦЕНКА ДИАПАЗОНА ДОСТОВЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ¹

© А. А. Апальков², И. Н. Одинцев³, А. С. Плотников⁴*Статья поступила 23 сентября 2015 г.*

С использованием метода конечных элементов получена численная оценка пределов достоверных измерений остаточных напряжений методом зондирующего отверстия. Показано, что при использовании подхода, основанного на базисных функциях, восстановление соотношения компонент напряженного состояния проводится с достаточной для практического применения точностью. Точное же восстановление величин компонент напряженного состояния возможно только при действующей интенсивности остаточных напряжений в диапазоне 0 – 0,7 от предела текучести исследуемого материала.

Ключевые слова: метод сверления отверстия; метод конечных элементов; остаточные напряжения; предел достоверных измерений; пластическое деформирование.

Для определения остаточных напряжений (ОН) первого рода на поверхности элементов конструкций (в частности, вблизи зон сварных соединений) наибольшее распространение на практике получил метод зондирующих отверстий [1, 2]. При исследовании тонкостенных объектов и массивных тел используют соответственно сквозные и несквозные (глухие) отверстия. При высверловке отверстий с достаточно малыми диаметром d и глубиной h такой метод измерения ОН можно рассматривать как условно неразрушающий.

Удаление напряженного объема материала при сверлении отверстия нарушает условия механического равновесия в данной локальной области тела. Обнуление отдельных компонент тензора напряжений на высвобождающейся поверхности формально можно описать как приложение к телу соответствующих напряжений обратного знака, что приводит к появлению характерного деформационного отклика, регистрируемого в эксперименте в той или иной его форме [1]. Значения ОН вычисляют по полученным данным, по существу, решением обратной задачи механики деформируемого твердого тела.

Как правило, деформационный отклик в терминах ОН интерпретируется приближенной моделью упру-

гого деформирования. Однако если напряжения в теле достаточно высоки, хотя и не превышают предела текучести материала, то реальный отклик может содержать и пластическую составляющую, так как высверленное отверстие является концентратором нерелаксированных напряжений, действующих в его окрестности. В упругопластической постановке обратная задача может вызывать не только значительные математические трудности, но и принципиальные ограничения. Вследствие этого в инженерных приложениях такой подход практически не используют. Вместе с тем неучет вклада пластических деформаций при их фактическом наличии приводит, очевидно, к неопределенно завышенным значениям получаемых напряжений. Такие величины носят заведомо условный характер и позволяют проводить анализ напряженного состояния в объекте исключительно на сравнительно-сопоставительном уровне (фактически по шкале порядков). Несмотря на наличие ряда работ, в которых в общей форме оговариваются ограничения, присущие подходам к обработке экспериментальных данных при измерении ОН в упругой постановке задачи [3, 4], данный вопрос, как представляется, требует более широкого анализа. Цель настоящей работы — расчетная оценка верхней границы диапазона параметров напряженного состояния, в пределах которого обработка экспериментальных данных в упругом приближении позволяет получать результаты со степенью достоверности, приемлемой для инженерных приложений.

Первое необходимое условие получения адекватных результатов связывается с выбором наиболее

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00531.

² Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалея, Москва, Россия; e-mail: apalkov@nikiet.ru

³ Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; e-mail: ino54@mail.ru

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия; e-mail: asp.model.gk@gmail.com

эффективного метода измерений деформационного отклика. В традиционных подходах, в том числе нашедших отражение в методиках, регламентированных рядом отраслевых стандартов, для регистрации деформаций в зоне отверстия (индикатора ОН) используют розетки малобазных тензорезисторов. Вместе с тем в последнее время с указанной целью все более активно применяют метод когерентной оптики: голографическую интерферометрию [5, 6], особенно электронную корреляционную спекл-интерферометрию [7 – 11]. Как известно [11], этот метод позволяет определять деформированное состояние на поверхности реальных объектов бесконтактно и с высокой точностью по визуализируемым картинам полос как изолиниям полей перемещений. Цена полосы на таких спеклограммах составляет десятки доли микрометра. Значительный объем исходной информации, получаемой в этом случае, обеспечивает наибольшую степень достоверности с точки зрения регистрации первичной экспериментальной информации.

Напомним [11], что в методе спекл-интерферометрии применение различных оптических схем интерферометра позволяет независимо измерять отдельные пространственные составляющие векторного поля перемещений: нормальную или тангенциальные. Для измерения, в частности, тангенциальной компоненты u_1 в направлении некоторой заданной оси OX_1 объект должен быть освещен совместно парой световых пучков, лежащих в плоскости OX_1Z и симметричных относительно оси OZ . Для определения тангенциальной компоненты u_2 , ортогональной u_1 , данная схема должна быть повернута вокруг OZ на 90° . Изображения объекта до и после его деформирования регистрируют с помощью цифровой видеокамеры, сопряженной с компьютером, в памяти которого его сохраняют в оцифрованном виде. Спеклограммы полей перемещений заданной направленности наблюдают при воспроизведении на мониторе компьютера разностных изображений, записанных в соответствующей схеме освещения. Величины перемещений в произвольных точках деформированного тела рассчитывают по порядкам полос N на спеклограммах по формуле

$$u_i = \lambda \frac{N}{2 \sin \varphi}, \quad (1)$$

где λ — длина волны используемого когерентного (лазерного) излучения; φ — угол падения симметричных освещающих пучков.

Расширенная интерпретация деформационного отклика в зоне отверстия в терминах ОН должна опираться на ту или иную модель механического поведения тела. В рамках упругой постановки обработка экспериментальных данных базируется на использовании известных функций влияния. Как правило, при этом принимается, что напряжения в теле однородны.

Функции влияния $F(r, \theta)$ и $G(r, \theta)$ определяются как поля перемещений соответственно u_1^0 и u_2^0 , вызванные засверловкой отверстия в теле, в котором действует единичное напряжение $\sigma_1^0 = 1$ ($\sigma_2^0 = 0$). (Начало полярной системы координат r, θ помещено в центр отверстия.) Предполагается, что данные функции в континуальном представлении получены предварительно, исходя из геометрических и механических характеристик объекта, а также формы и размеров отверстия-индикатора. В случае малых сквозных отверстий в тонкостенных элементах конструкций с этой целью используют решение в перемещениях задачи Кирша [9]. Для глухих отверстий применяют моделирование упругих полей перемещений в окрестности высверленного отверстия в теле, содержащем ОН, с помощью метода конечных элементов. При этом получаемые значения перемещений в узлах конечно-элементной сетки аппроксимируют подходящими непрерывными зависимостями. В данной работе использовали результаты, приведенные в статье [10]. Для простоты предположим, что оси чувствительности спекл-интерферометра априори совпадают с главными осями ОН. (Такое допущение не оказывает влияния на существо рассматриваемой задачи о воздействии возможной реальной неупругости отклика на результат косвенных измерений ОН.) Пусть после первичной обработки спеклограмм получены два множества экспериментальных точек — u_{1i} и u_{2j} , где $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m; n, m$ — число точек в этих множествах. (Данные точки в основном выбирают на темных полосах соответствующих спеклограмм.) Тогда искомые значения напряжений σ_1 и σ_2 рассчитывают путем решения по методу наименьших квадратов переопределенной системы из $m + n$ уравнений:

$$\begin{cases} \dots \\ u_{1i}(r_i, \theta_i) = \sigma_1 F(r_i, \theta_i) + \sigma_2 G\left(r_i, \frac{\pi}{2} - \theta_i\right) + u_{10}; \\ u_{2j}(r_j, \theta_j) = \sigma_1 G(r_j, \theta_j) + \sigma_2 F\left(r_j, \frac{\pi}{2} - \theta_j\right) + u_{20}, \\ \dots \end{cases} \quad (2)$$

где константы u_{10} и u_{20} представляют собой дополнительные неизвестные, необходимые для учета возможных смещений тела как жесткого целого относительно измерительной системы в процессе засверловки отверстия. Введение данных параметров требуется лишь для адекватного моделирования реального деформационного отклика объекта.

Сформулированная процедура обработки экспериментальных данных позволяет получать с известной точностью действительные значения ОН лишь при условии упругого деформационного отклика, что и было положено в основу принципа его моделирования (в частности, использующего линейную суперпозицию вкладов в поля перемещений, вызываемых отдельными компонентами двухмерного поля ОН).

Формальное применение тех же действий в случаях появления пластических деформаций приводит к получению напряжений, завышенных по отношению к реальным. Кроме того, при сложном характере реального напряженного состояния соотношение между формально найденными значениями напряжений также может оказаться отличным от истинного.

Описанное явление наглядно обнаруживается в тестовом эксперименте, в котором ОН моделировали действующими напряжениями, самоуравновешенными в системе объект – нагружающее устройство. (Общая постановка эксперимента описана в документе [12].) На предварительном этапе проверяли наличие или отсутствие в материале фактических остаточных напряжений. Было установлено, что их возможный уровень не превосходил порога чувствительности метода измерений, по крайней мере.

Тестируемый образец схематизировали в виде деформируемой при чистом изгибе балки длиной 200, шириной 36 и толщиной 18 мм. Материал — алюминиевый сплав с пределом текучести $\sigma_T \approx 250$ МПа. В пределах всей рабочей зоны на поверхности образца реализовывали однородное одноосное поле напряжений путем его нагружения изгибающим моментом и заневоливания в данном состоянии.

Заметим, что имевшие место в образце напряжения σ_1 линейно зависели от координаты z , т.е., строго говоря, отличались от полностью однородного модельного поля (на удалении от зоны засверловки), использованного при расчете функций влияния. Однако ввиду того, что глубину высверливаемых отверстий-индикаторов выбирали заметно меньшей полутолщины образца ($h = 3$ мм, $d = 2$ мм), изменения напряжений по глубине отверстия были не столь значительны. Кроме того, как известно, вклады отдельных «слоев» материала в регистрируемый деформационный отклик быстро уменьшаются с удалением этих «слоев» от поверхности тела [2].

При указанных условиях на рабочей части образца проведена серия засверловки отверстий-индикаторов при возрастающих значениях приложенного изгибающего момента. Для исключения взаимного влияния зон локальных деформационных возмущений расстояния между отверстиями увеличивали с ростом нагрузки. Измерения деформационных откликов выполняли методом спекл-интерферометрии. На рис. 1 в качестве иллюстрации приведены типичные картины полос, наблюдаемые в зоне засверловки. В результате обработки первичных данных по описанной методике получены результаты, представленные в таблице. Как можно заметить, начиная с некоторого значения реально действующего напряжения σ_1 , меньшего предела текучести материала, наблюдается описанный выше монотонный рост погрешностей определения обеих компонент напряжений. Иными словами, погрешность, вызванная неадекватностью (упругой) модели, начинает превалировать над погрешностью

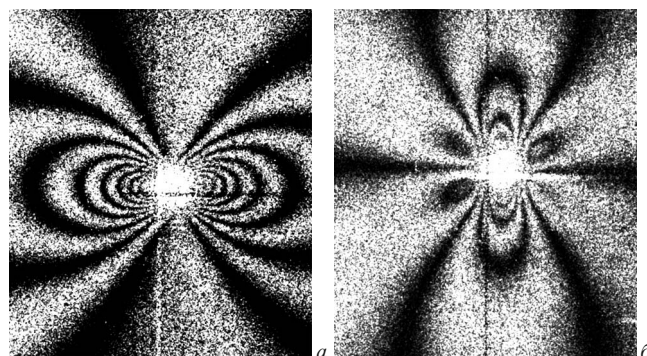


Рис. 1. Спеклограммы полей горизонтальных (u) и вертикальных (v) перемещений в зоне засверловки отверстия для определения остаточных напряжений

самого метода, слагающейся из ошибок определения координат экспериментальных точек (в основном), ошибок счета и т.п. Для погрешности метода представляется справедливой оценка $\sim \pm 15$ МПа.

Очевидно, что получение экспериментальным путем аналогичных результатов для широкого диапазона видов напряженного состояния сопряжено со значительными техническими трудностями. В связи с этим такие исследования выполняли на основе моделирования задачи с использованием метода конечных элементов, а именно, в программном комплексе ANSYS Structural версии 14.0. Для проведения расчетов разработан модель исследуемой области тела. Геометрическая модель представляет собой прямоугольный параллелепипед, одно из ребер которого совпадает с осью отверстия. Таким образом, модель является основным элементом симметрии, составляющим 1/4 часть полной области. Часть модели, соответствующая удаляемому при высверловке материалу, выделена в отдельную подобласть для процедур, связанных с перестроением сетки. При нанесении конечно-элементной сетки применяли радиально-кольцевую структуру со сгущением вблизи границ отверстия. Разбиение строили на основе гексаэдральных элементов второго порядка SOLID186 [13].

Для описания механического поведения материала использовали модель диаграммы с начальным линейно-упругим участком и пластичностью по теории течения с критерием Мизеса и изотропным упрочне-

Результаты тестового эксперимента

Номер эксперимента	Задано ($\sigma_2 = 0$)	Получено в эксперименте	
	σ_1 , МПа	σ_1 , МПа	σ_2 , МПа
1	80	81	5
2	110	112	-4
3	140	130	-6
4	170	177	-13
5	200	191	-17
6	230	254	2
7	260	335	20
8	290	486	30

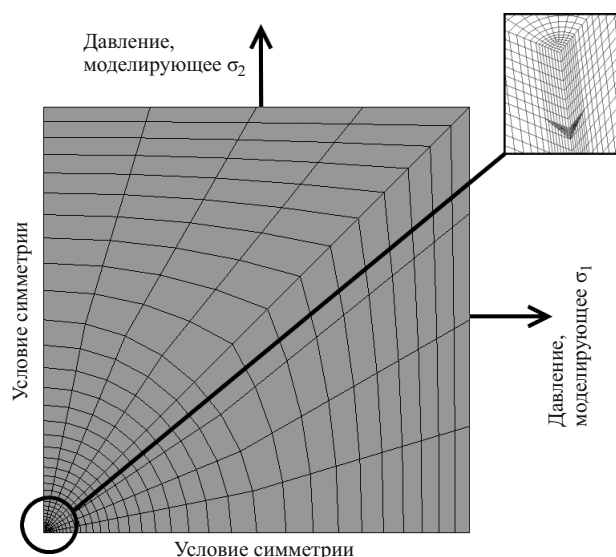


Рис. 2. Конечно-элементная модель тела

нием. Диаграмму деформирования принимали полилинейной. Упругие постоянные материала составили: модуль упругости $E = 205$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$. Задаваемые точки диаграммы деформирования приведены ниже:

Истинные напряжения, МПа	Истинные деформации, 10^{-3}
325,0	1,6
352,0	3,0
355,0	6,0
360,4	9,0
370,5	12,0
380,7	15,0
391,0	18,0
415,4	23,0

Для организации вычислений разработан макрос на языке APDL [16], выполняющий серию однотипных расчетов с различными нагрузками в автоматическом режиме. При формулировке граничных условий (рис. 2) учитывали очевидные соотношения симметрии для напряженно-деформированного состояния тела в целом. В случае узлов с тремя трансляционными степенями свободы запрещались перемещения по нормали к плоскостям симметрии. Верхняя и нижняя грани модели были свободны от усилий и закреплений. В качестве нагрузки, формально моделирующей остаточные напряжения в теле, рассматривали равномерное давление, прикладываемое к соответствующим боковым граням. Величины прикладываемых давлений вычисляли макросом для каждого расчета через косвенные параметры — задаваемый уровень интенсивности напряжений и параметр вида напряженного состояния. Уровень интенсивности напряжений σ_i устанавливали в долях от предела текучести σ_t модельного материала. Параметр вида напряженного

состояния g определяли как отношение давлений, действующих по осям OX_2 и OX_1 , т.е. фактически

$$g = \sigma_2 / \sigma_1. \quad (3)$$

Определяемый таким образом параметр g принимает значения от -1 (чистый сдвиг) до 1 (двухосное растяжение); $g = 0$ соответствует одноосному растяжению. В выполненных расчетах параметр вида напряженного состояния варьировали от -1 до 1 с шагом $0,05$, что обуславливает наличие 41 расчетного вида напряженного состояния для каждого задаваемого уровня интенсивности напряжений.

Для моделирования деформационного отклика, возникающего в результате высверливания отверстия в теле с напряжениями (прямая задача), каждый расчет выполняли в два шага. На первом шаге нагрузку прикладывали к полной модели (тело без отверстия) и вычисляли перемещения u_{11} и u_{21} на внешней поверхности. На втором шаге из модели удаляли сетку, соответствующую области отверстия, после чего вычисляли перемещения u_{12} и u_{22} на поверхности тела с отверстием. Результатом каждого расчета являлся файл, содержащий информацию о распределении значений разности узловых перемещений: $u_{12} - u_{11}$ и $u_{22} - u_{21}$.

Принятый в работе подход к расчету ОН, основанный на удалении зоны сеточного разбиения, соответствующей высверленному отверстию, с одной стороны, «физически» отвечает используемой процедуре исследования ОН, а с другой — обеспечивает возможность непосредственного решения задачи при наличии упругопластических деформаций на основе ПК ANSYS. Заметим, что применение стандартной процедуры, основанной на расчете упругопластической задачи о нагружении «освобождаемых» поверхностей отверстия напряжениями, равными по величине и противоположными по знаку искомому ОН, и при этом учитывающей имеющееся поле ОН, потребовало бы разработки специального алгоритма решения, соответствующего используемой теории пластичности.

В дальнейшем для имитации экспериментальных данных, получаемых методом спекл-интерферометрии, массив результатов вида координата узла — перемещения в узле преобразовывался в массив вида координата точки на полосе на спеклограмме — целочисленный порядок полосы. Для этого путем интерполяции данных в исходных массивах отыскивали координаты точек, в которых перемещения отвечали значениям, определяемым по формуле (1). При этом для параметров виртуальной экспериментальной установки устанавливали значения $\lambda = 532$ нм, $\varphi = 45^\circ$. Дальнейшие действия соответствовали процедуре обработки экспериментальных данных, описанной выше (обратная задача).

Необходимо отметить, что рассмотренный подход является в известной степени упрощенным. Во-первых, здесь не учитывается постепенность процесса удаления материала при высверливании отверстия,

а рассматривается только разность конечного и начального состояний. (Очевидно, что это имеет значение лишь при решении задачи в упругопластической постановке.) Однако более детальные исследования, выполненные для некоторых частных случаев, показали, что указанное упрощение не оказывает существенного влияния на точность моделирования итоговых полей перемещений. Вместе с тем использованный («разностный») подход позволяет значительно (до пяти раз) сократить машинное время, затрачиваемое на счет. Во вторых, принимаемая модель игнорирует возможную предысторию неупругого деформирования материала. Иными словами, полагается, что поведение материала адекватно описывается исходной диаграммой деформирования.

В итоге проведенного имитационного моделирования экспериментов по определению ОН с использованием функций влияния в упругом приближении (на этапе обработки «экспериментальной» информации) получен массив данных, несущий информацию о зависимости восстановленных напряжений от приложенных напряжений. Представим анализ результатов в терминах совершаемых ошибок в определении интенсивности напряжений $\Delta(\sigma_i)$ и вида напряженного состояния. Ошибку $\Delta(\sigma_i)$ будем характеризовать отношением восстановленной интенсивности напряжений $(\sigma_i)_{\text{экс}}$ к величине заданной (истинной) интенсивности $(\sigma_i)_{\text{ист}}$:

$$\Delta(\sigma_i) = (\sigma_i)_{\text{экс}} / (\sigma_i)_{\text{ист}}. \quad (4)$$

При абсолютно точном восстановлении ОН $\Delta(\sigma_i) = 1$. Для иллюстрации результатов удобно воспользоваться диаграммой ошибок, которая представлена на рис. 3. Каждый замкнутый контур на ней соответствует определенному уровню заданной интенсивности напряжений $(\sigma_i)_{\text{ист}}$. Каждая точка контура отражает определенный вид напряженного состояния $g_{\text{ист}}$ и ошибку определения интенсивности для него. Согласно построению параметр вида напряженного состояния равен тангенсу угла наклона θ радиус-вектора, проведенного из начала координат к рассматриваемой точке:

$$\text{tg}(\theta) = g_{\text{ист}}; \quad (5)$$

длина радиус-вектора равна величине ошибки $\Delta(\sigma_i)$. Окружность единичного радиуса соответствует отсутствию ошибки для всех видов напряженного состояния. Заметим, что по данным, полученным непосредственно из выполненных расчетов, могут быть построены дуги контуров только в диапазоне направляющих углов радиус-векторов $-\pi/4 \leq \theta \leq \pi/4$. Для продления их до замкнутых контуров используют очевидные соотношения симметрии.

Приведенная диаграмма (см. рис. 3) демонстрирует, что заметная величина ошибки имеет место уже при сравнительно невысокой нагруженности материа-

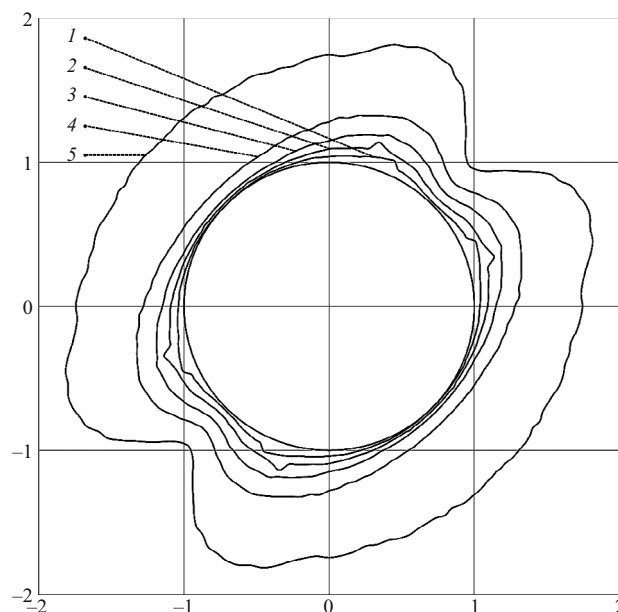


Рис. 3. Диаграмма ошибок определения интенсивности остаточных напряжений при различных ее величинах: 1 — $0,6\sigma_T$; 2 — $0,7\sigma_T$; 3 — $0,8\sigma_T$; 4 — $0,9\sigma_T$; 5 — σ_T

ла. Так, для случая чистого сдвига ошибка $\Delta(\sigma_i) \sim 1,1$ возникает при уровне интенсивности напряжений $\sim 0,8$ от предела текучести материала, для случаев одноосного растяжения-сжатия и равного двухосного растяжения-сжатия — $\sim 0,7\sigma_T$. Полученный результат достаточно хорошо коррелирует с приведенными ранее экспериментальными данными. Условно можно полагать, что данный уровень является ограничением для достоверных оценок ОН и в реальном эксперименте. С ростом истинной интенсивности напряжений ошибка ее восстановления быстро прогрессирует, при этом имеет место ее существенная анизотропия по отношению к виду напряженного состояния. В этом плане наиболее опасными являются случаи неравного двухосного растяжения-сжатия при отношении компонент напряжений $0,25 - 0,35$. Для этих напряженных состояний ошибка $\Delta(\sigma_i)$ при $\sigma_i = 0,9\sigma_T$ достигает $\sim 1,4$ (т.е. относительная погрешность $\sim 40\%$).

Практический интерес представляет также анализ ошибок в определении вида напряженного состояния. Графики, характеризующие расхождение между задаваемыми $g_{\text{ист}}$ и восстановленными $g_{\text{экс}}$ параметрами вида напряженного состояния, приведены на рис. 4. Можно заметить, что величина ошибки определения g в целом коррелирует с ошибкой определения величины интенсивности. Однако в целом ошибка для g не превышает 8 % даже при величине интенсивности напряжений $0,9\sigma_T$. Это позволяет считать, что вид напряженного состояния определяется в эксперименте достаточно точно, что дает возможность использовать диаграмму ошибок для оценки достоверности величин получаемых напряжений.

В заключение отметим, что результаты ряда дополнительных модельных расчетов с использованием

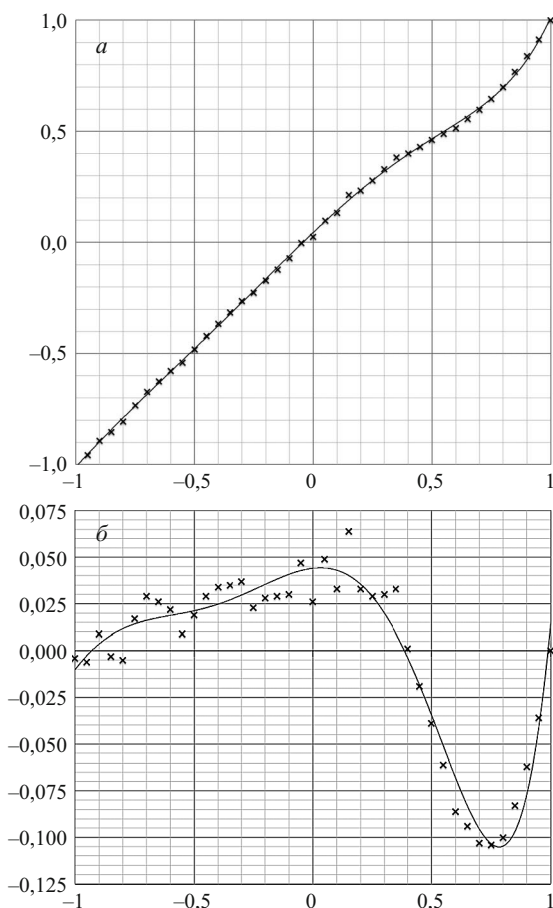


Рис. 4. Зависимости $g_{\text{экс}}$ (а) и $g_{\text{экс}} - g_{\text{ист}}$ (б) от $g_{\text{ист}}$

различных диаграмм деформирования материала показывают, что приведенный вид диаграммы ошибок $\Delta(\sigma_i)$ является достаточно универсальным. Во всех рассмотренных случаях наблюдалась существенная зависимость величины данной ошибки от вида напряженного состояния с характерным пиком вблизи отношения главных напряжений $\sim 0,3$. Теоретический анализ природы выявленной закономерности является предметом отдельного рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. — М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. — 233 с.
2. Экспериментальная механика. В 2 т. Т. 2 / Под ред. А. Кобаяси. — М.: Мир, 1990. — 551 с.
3. Антонов А. А., Бобрик А. И., Морозов В. К. и др. Определение остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерферометрии / Механика твердого тела. 1980. № 2. С. 41 – 43.
4. Чернышев Г. Н., Попов А. Л., Козинцев В. М., Пономарев И. И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. — М.: Наука, 1996. — 240 с.
5. Писарев В. С., Щепинов В. П., Щиқанов А. Ю. Использование интерферометров на основе отражательных голограмм для определения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия / Журнал технической физики. 1996. Т. 66. № 1. С. 99 – 113.
6. Одинцев И. Н., Щепинов В. П., Щиқанов А. Ю. Применение голографической интерферометрии для измерения остаточных напряжений методом зондирующего отверстия / Журнал технической физики. 2003. Т. 73. № 11. С. 106 – 110.

7. Steinzig M., Ponslet E. Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry / Exp. Techniq. 2003. N 5. P. 43 – 46.
8. Viotti M. R., Kaufmann G. H. Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stresses / Optics Lasers Eng. 2004. Vol. 41. N 2. P. 297 – 305.
9. Апальков А. А., Одинцев И. Н., Разумовский И. А. Интерпретация картин полос при измерении остаточных напряжений с использованием электронной спекл-интерферометрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002. Т. 68. № 5. С. 39 – 41.
10. Апальков А. А., Одинцев И. Н., Разумовский И. А. Метод измерения остаточных напряжений в массивных элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. № 2. С. 45 – 49.
11. Разумовский И. А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. — М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 240 с.
12. Анпилов А. В., Киселев Александр С., Киселев Алексей С., Ларкин А. И. и др. Определение остаточных сварочных напряжений на основе совместного использования методов голографической интерферометрии и конечных элементов. — М.: Издательство МИФИ, 2007. — 124 с.
13. Release 14.0 Documentation for ANSYS [электронный документ] / ANSYS Inc. Электрон. дан. и прогн..

REFERENCES

1. Birger I. A. Ostatochnye napryazheniya [Residual stresses]. — Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noi literatury, 1963. — 233 p. [in Russian].
2. Kobayashi A. S. Handbook on Experimental Mechanics. — Seattle: Society for Experimental Mechanics, 1993. — 1020 p.
3. Antonov A. A., Bobrik A. I., Morozov V. K., et al. Opredelenie ostatochnykh napryazhenii pri pomoshchi sozdaniya otverstii i golograficheskoi interferometrii [Residual stresses determination with use of hole drilling and holographic interferometry] / Mekh. Tverdogo Tela. 1980. N 2. P. 41 – 43 [in Russian].
4. Chernyshov G. N., Popov A. L., Kozintsev V. M., Ponomarev I. I. Ostatochnye napryazheniya v deformiruemyykh tverdykh telakh [Residual stresses in deformed solid body]. — Moscow: Nauka, 1996. — 240 p. [in Russian].
5. Pisarev V. S., Shchepinov V. P., Shchikanov A. Yu. Using reflection-hologram interferometers for determining residual stresses by the probe-hole method / Techn. Phys. 1996. Vol. 66. N 1. P. 50 – 57.
6. Odintsev I. N., Shchepinov V. P., Shchikanov A. Yu. Holographic interferometry for measuring residual stresses by using probing holes / Techn. Phys. 2003. Vol. 48. N 11. P. 1464 – 1467.
7. Steinzig M., Ponslet E. Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry / Exp. Techniq. 2003. N 5. P. 43 – 46.
8. Viotti M. R., Kaufmann G. H. Accuracy and sensitivity of a hole drilling and digital speckle pattern interferometry combined technique to measure residual stresses / Optics Lasers Eng. 2004. Vol. 41. N 2. P. 297 – 305.
9. Apalkov A. A., Odintsev I. N., Razumovskiy I. A. Interpretatsiya kartin polos pri izmerenii ostatochnykh napryazhenii s ispol'zovaniem elektronnoi spekl-interferometrii [The fringe pattern interpretation by the measuring of residual stresses with use electronic speckle interferometry] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2002. Vol. 68. N 5. P. 39 – 41.
10. Apalkov A. A., Odintsev I. N., Razumovskiy I. A. Metod izmereniya ostatochnykh napryazhenii v massivnykh elementakh konstruktssii s ispol'zovaniem elektronnoi spekl-interferometrii [The technique for measuring of residual stresses in massive structural elements with use electronic speckle interferometry] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2003. Vol. 69. N 2. P. 45 – 49.
11. Razumovskiy I. A. Interference-optical methods of solid mechanics. — Springer, 2011. — 179 p.
12. Anpilov A. V., Kiselev Aleksandr S., Kiselev Aleksei S., Larkin A. I., et al. Opredelenie ostatochnykh svarochnykh napryazhenii na osnove sovmestnogo ispol'zovaniya metodov golograficheskoi interferometrii i konechnykh elementov [Determination of welding residual stresses on the base of holographic interferometry and finite element method]. — Moscow: Izd. MIFI, 2007. — 124 p. [in Russian].
13. Release 14.0 Documentation for ANSYS [electronic document] / ANSYS Inc. Electronic data and software.