

УДК 621.77

Алиев И. С.
Матвийчук В. А.
Махмудов К. Д.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА СЛУЖЕБНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ

Качество изделий по определению Европейской организации контроля качества, это «...выполнение им требований потребителя. Качество промышленных изделий является сочетанием качества проекта и качества изготовления». Безусловно, сюда следует отнести и качество эксплуатации, которое отображается служебными характеристиками изделия. Следовательно, установление качества изделия представляет собой выбор различных признаков, характеризующих изделие, и параметрических величин этих признаков. К важным характеристикам качества относят те, которые имеют существенное значение с точки зрения пригодности изделия, т. е. наилучшим образом удовлетворяют требования потребителя. При этом их значения и предъявляемые к ним требования существенно зависят от конкретного назначения изделия.

Методы локального деформирования [1] занимают особое место среди процессов обработки металлов давлением, в т. ч. и в способности обеспечивать высокие служебные характеристики изделий. При локальном деформировании очаг деформации сосредотачивается в ограниченном объеме материала заготовки, а формообразование происходит в результате последовательного взаимного перемещения деформирующего инструмента и заготовки. Незначительная площадь контакта инструмента с заготовкой обуславливает невысокие, по сравнению с объёмной штамповкой, усилия деформирования. Благоприятные условия течения материала в зоне контакта способствуют формированию развитых тонкостенных элементов заготовок сложной формы, а возможность управлять направлением течения металла и осуществлять операцию калибровки позволяет достигать высокой геометрической точности деталей. При этом важной задачей является обеспечение высоких служебных характеристик производимых изделий.

Целью работы является повышение служебных характеристик изделий путем использования методов локального деформирования и исследование факторов, способствующих этому повышению.

Для эффективного управления качеством необходимо точное знание особенностей всех явлений, протекающих при локальном деформировании. Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо решать задачи, связанные с анализом кинематики локального деформирования и напряженно-деформированного состояния (НДС), оценкой деформируемости материала заготовок и влияния перечисленных факторов на служебные характеристики изделий. Поскольку работа посвящена исследованию комплекса служебных характеристик изделий, производимых методами локального деформирования, то в качестве основных критериев были приняты: геометрические параметры; механические характеристики материала; характеристики поверхностного слоя; специальные служебные свойства изделий.

С целью исследования влияния различных факторов на характер распределения НДС в зоне локального деформирования производилось вдавливание шарика и ролика в плоское полупространство. Исследование проводили на высокопрочном сплаве ЭП718, имеющем сильную зависимость твёрдости от интенсивности деформаций. Вдавливание осуществляли на различную глубину с различными граничными условиями: всухую, а также с применением в качестве смазки коллоидного графита, полиэтилена, свинцовой и медной фольги. На рис. 1, а приведен типичный характер распределения интенсивности деформации в зоне отпечатка, полученный методом измерения твердости.

Характер деформированного состояния в зоне отпечатка является весьма неравномерным. Интенсивность деформации у поверхности лунки составляет всего лишь 50–80 %

максимальной. Наибольшая интенсивность деформаций имеет место вблизи центра отпечатка и удалена от поверхности контакта на глубину $\approx 0,1 d$, при этом глубина распространения пластической зоны $h_{pl} \approx (1,5-1,6)d$, где d – диаметр отпечатка или его ширина.

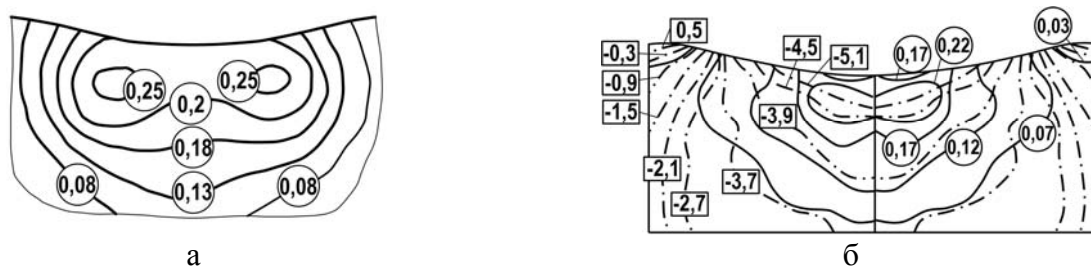


Рис. 1. Распределение в области отпечатка изолиний:

а – $\varepsilon_u = const$ (○), полученных измерением твёрдости; б – $\eta = const$ (□) и $\varepsilon_u = const$ (○), полученных методом сеток

Для исследования НДС пластической зоны при вдавливании инструмента применен также метод координатных делительных сеток, построенный на использовании методики, основанной на теории R -функций. Производилось поэтапное вдавливание в заготовку шарика (осесимметричная задача) и многократное поэтапное вдавливание ролика (плоская задача). Характер распределения изолиний $\varepsilon_u = const$ в зоне отпечатка, полученный по результатам измерения координатной делительной сетки (рис. 1, б) и измерения твердости (рис. 1, а), совпадает.

По мере локального деформирования, деформированное состояние у обрабатываемой поверхности становится однородным, однако характер его изменения по глубине сохраняет закономерности единичного вдавливания. Рассмотрим особенности формирования высоких служебных характеристик изделий на примере технологических процессов локального деформирования.

Торцовая раскатка.

При торцовой раскатке заготовок цилиндрическим валком направление течения материала заготовки зависит, главным образом, от величины и направления смещения оси вала от оси поперечного сечения заготовки δ , по отношению к направлению вращения заготовки. Основными влияющими параметрами при торцовой раскатке коническим валком являются угол наклона α оси вала, а также величина и направление смещения вершины вала α по отношению к оси вращения заготовки.

С использованием аппарата аналитической геометрии была получена зависимость угла φ между векторами скорости точек контактной поверхности заготовки и вала от параметров процесса раскатки [2]. Анализ полученной зависимости показывает, что при положительном смещении вершины вала (от оси вращения заготовки в направлении пятна контакта) материал течёт от центра заготовки ($\varphi < 0$), а при отрицательном – к центру ($\varphi > 0$). Интенсивность течения не симметрична относительно нулевого смещения, т. е. материал более интенсивно течёт в направлении от центра. При увеличении угла α интенсивность центробежного течения усиливается. Максимальная интенсивность течения наблюдается на расстоянии $r < 0,2R$ от центра заготовки. Установленное влияние активных сил трения на характер течения материала способствовало разработке ряда эффективных процессов торцовой раскатки, позволяющих максимально приблизить форму и размеры заготовки к готовой детали. При этом точность размеров получаемых изделий соответствует 8–11-му квалитетам точности, а шероховатость обработанных поверхностей $R_a = 2,5 \dots 0,63$ мкм. Важным преимуществом холодной торцовой раскатки является также возможность осуществления калибровки раскаткой деталей сложной формы по 6–8-му квалитетам точности и $R_a = 0,16 \dots 0,32$ мкм.

Комбинированное деформирование кольцевых заготовок раскаткой, с совмещением схем высадки, обратного и прямого выдавливания (рис. 2, а), применяется при производстве сложно профилированных изделий, которыми являются корпусные детали электровакуумных приборов, воротниковые фланцы трубопроводов и пр. На рис. 2, б представлены изолинии распределения интенсивности напряжений $\sigma_u = const$ и деформаций $\varepsilon_u = const$ в сечении заготовки корпуса электровакуумного прибора из меди М0б на заключительной стадии раскатки, полученные методом измерения твёрдости.

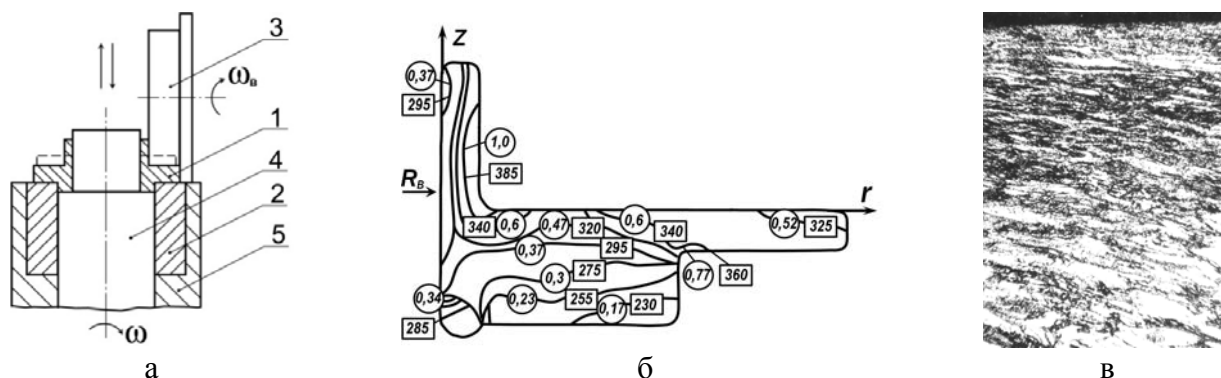


Рис. 2. Технологическая схема комбинированной раскатки (а); характер распределения в сечении кольцевой заготовки из меди М0б параметров $\varepsilon_u = const$, $\sigma_u = const$ (б) и вид микроструктуры у её горизонтальной поверхности (в)

Наряду с методом измерения твёрдости, для исследования НДС в сечении заготовки был применён также микроструктурный анализ. Характерной особенностью процесса раскатки является то, что зерна металла существенно утоняются в направлении перпендикулярном к поверхности обработки, а непосредственно вблизи контактной поверхности также измельчаются (рис. 2, в).

Проверкой микроструктуры на однородность было установлено, что зерна меди М0б неоднородны и, следовательно, микроструктурный метод не может быть использован для нахождения компонент деформаций. Поэтому результаты исследования микроструктуры использовались лишь для определения направления главных деформаций в сечении заготовки, а также для качественного подтверждения результатов, полученных измерением твёрдости.

Микроструктурным анализом установлено, что в тонкостенном элементе корпуса и в сечении фланца главная деформация ε_3 перпендикулярна, а деформации ε_1 и ε_2 параллельны контуру, сформированному валком. При этом деформация ε_3 является деформацией сжатия, а ε_1 и ε_2 – деформациями растяжения. Приняв допущение, что $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, и учитывая условие несжимаемости, а также, используя принцип Тейлора-Поляни, что в процессе пластического деформирования элементарная сфера преобразуется в эллипсоид, по направлению и величине главных осей которого можно определить все параметры деформированного состояния в объёме данной материальной точки, определили увеличение размеров зерна в исследуемой плоскости заготовки по соотношению:

$$D_1/D_0 = \exp 0,5\varepsilon_u .$$

В зоне фланца и тонкостенного элемента корпуса электровакуумного прибора величина интенсивности деформаций составила $\varepsilon_u = 0,6 - 1,0$, следовательно, размер зерна в плоскости контакта вала с заготовкой увеличился в 1,4–1,7 раза. Полученное увеличение зерна существенно повысило вакуумную герметичность изделий, поскольку даже при наиболее неблагоприятной структуре ($D_0 = 50 - 200$ мкм), когда негерметичными являются 100 % изделий, увеличение размеров зерна, наблюдаемое при раскатке, должно привести к обеспечению герметичности для 80 % изделий [3].

Таким образом, исследование НДС заготовок методом измерения твёрдости и микроструктурным анализом позволяет прогнозировать такую служебную характеристику производимых изделий, как вакуумную плотность, по изменению размера зёрен в раскатываемой плоскости. Вместе с тем, на вакуумную плотность, а также другие служебные характеристики изделия, может оказывать отрицательное влияние чрезмерное пластическое разрыхление металла в процессе раскатки. Проведенная оценка деформируемости материала заготовки показала, что величина использованного ресурса пластичности для меди М06 является незначительной и не сказывается на снижении вакуумной герметичности изделия. Испытание изделий подтвердило повышение их вакуумной герметичности по сравнению с другими методами изготовления.

Переформовка раскаткой квадратных заготовок в круг (рис. 3, а) является эффективной при изготовлении заготовок под последующую вытяжку, поскольку делает производство малоотходным. Уменьшению утонения центральной части заготовки способствует применение раскатки с небольшим углом наклона валка, для чего наилучшим образом подходит процесс сферодвижной штамповки с $\alpha = 2^\circ$.

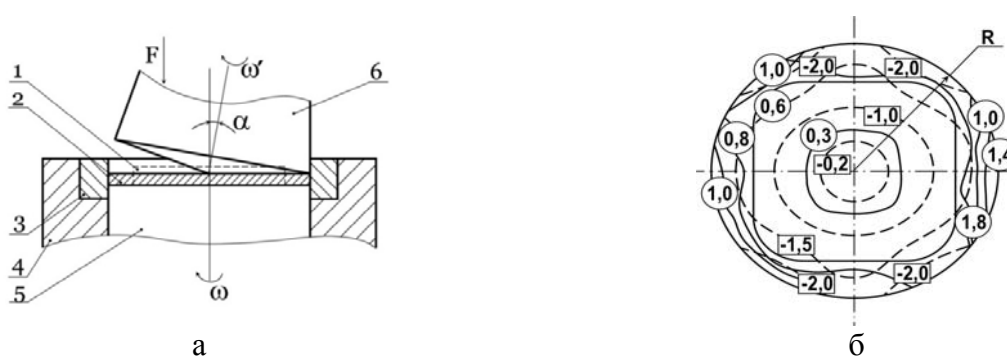


Рис. 3. Схема переформовки (а) и характер распределения интенсивности деформаций ε_u —○— и показателя напряжённого состояния η —□— (б) переформованной с квадрата на круг заготовки

На рис. 3, б показан характер распределения НДС на поверхности танталовой заготовки, переформованной с квадрата в круг диаметром $d = 31$ мм. Минимальная интенсивность деформации ($\varepsilon_u \leq 0,5\varepsilon_u^{\max}$) наблюдается в центральной части заготовки на площади, ограниченной окружностью радиусом $r = 0,6R$. Наибольшая интенсивность деформации достигает значений $\varepsilon_u^{\max} = 1,2 - 1,4$ на контуре заготовки в зонах, соответствующих серединам сторон исходного квадрата. Напряжённое состояние изменяется от $\eta = 0 - 0,5$ в центре заготовки, до $\eta = -2$ вблизи её периферии и $\eta = -0,7 \dots -1,0$ на боковых поверхностях. Следует отметить, что приведенный на рис. 3, б характер распределения НДС при угле $\alpha = 2^\circ$ является относительно стабильным для заготовок разных размеров, поскольку определяется постоянным отношением стороны квадрата заготовки к его диагонали или диаметру изделия. Если ж приведенные на рис. 3, б параметры НДС являются неприемлемыми при деформировании материалов с недостаточной пластичностью, то их следует ограничить, используя заготовки со срезанными углами квадрата. Для относительно высоких заготовок ($h_0/b \geq 0,1$) уменьшение интенсивности центробежного течения металла и устранение опасности разрушения центральной части изделия возможно путем переформирования в подпружиненной матрице при смещении вершины валка за ось заготовки, в направлении противоположном очагу деформации ($\delta < 0$).

Применение процесса переформовки изменяет анизотропию механических свойств материала заготовок. Так, степень плоской анизотропии λ_r , принятая в листовой штамповке в качестве характеристики способности материала к образованию фестонов, уменьшилась

в результате переформовки на 70–80 %. Относительный перепад предела текучести в плоскости листа уменьшился с 0,10–0,15 до 0,03–0,05. Предельная деформация на растяжение увеличилась на 8–10%, а предельная равномерная деформация на 5–8 %.

Отмеченное улучшение характеристик материала переформованных раскаткой заготовок привело к тому, что при вытяжке цилиндрических изделий величина фестонов уменьшилась в 2–2,5 раза, а величина предельной степени вытяжки возросла на 10–15 %. При этом уменьшилась относительная разница толщин стенки по периметру вытянутой заготовки, а изменение толщины стенки по её высоте приобрело линейный характер. Что касается служебных характеристик изделий, то использование переформованных танталовых заготовок под вытяжку корпусов конденсаторов позволило увеличить электролитическую стойкость конденсаторов в 2–3 раза в результате формирования благоприятной микроструктуры материала и уменьшения его пластического разрыхления.

Поверхностно-пластическое деформирование.

Поверхностно-пластическое деформирование (ППД) применяется для повышения служебных характеристик поверхностного слоя и детали в целом. Повышение эффективности процесса ППД возможно путем управления глубиной, характером распределения остаточных напряжений и величиной использованного ресурса пластичности в поверхностном слое изделия.

Размещение максимальных деформаций под поверхностью (рис. 1) приводит к тому, что и максимальное исчерпание ресурса пластичности металла также происходит на некоторой глубине, которая зависит от размера пластического отпечатка, а, следовательно, от размера инструмента и глубины его вдавливания. Поэтому при полном исчерпании ресурса пластичности ($\psi_u = 1$) разрушение поверхностного слоя при ППД происходит не на самой поверхности, а в виде её шелушения.

Использование ресурса пластичности сопровождается пластическим разрыхлением или уменьшением плотности металла [1]. Максимальное уменьшение плотности и, следовательно, относительное увеличение объема металла в зоне максимальных деформаций, вследствие исчерпания им ресурса пластичности, и объясняет эффект уменьшения остаточных напряжений сжатия на поверхности деталей при ППД. При этом характер распределения остаточных напряжений отвечает характеру распределения в поверхностном слое интенсивности деформаций и величины использованного ресурса пластичности. В результате наиболее сжатой оказывается зона поверхностного слоя, в которой при ППД накапливаются максимальные деформации и происходит наибольшее относительное увеличение объема металла. Т. е. зона, отдаленная от поверхности контакта на глубину $\approx 0,1d$.

Установление отмеченного факта и определяет пути совершенствования процесса ППД, учитывая, что наиболее эффективным есть пластическое упрочнение, при котором максимальные напряжения сжатия имеют место на поверхности изделия. Таким образом, для повышения служебных характеристик деталей следует использовать технологические приёмы, смещающие зону максимальных деформаций и зону максимальных остаточных напряжений сжатия к поверхности. Проведенные исследования показали, что к таким приёмам можно отнести: использование на заключительных этапах ППД тел деформирования меньших размеров; использование эффективной смазки или мягкого пластического покрытия для уменьшения сил трения; направления силы действия инструмента под переменным углом к поверхности для уменьшения зон застоя; использование абразивных примесей для снятия частиц металла и приближения зон с максимальными накопленными деформациями к поверхности.

На основании проведенных исследований были отработаны режимы турбоабразивной обработки компрессорных лопаток в среде «кипящей» смеси металлических и абразивных элементов, отношение средних размеров которых составляло $d_{\text{ш}} / d_{\text{а}} = 0,8...1,5$. Размеры зерен абразивных частиц 80...100 мкм и стальных шариков 80...200 мкм были подобраны для наибольшего приближения зоны с максимальными деформациями к поверхности лопаток, а также исходя из технологических возможностей установки. Абразив введено также для

снятия гребешков, ухудшающих условия деформируемости металла и чистоту поверхности. Для равномерной обработки поверхности лопаток осуществлялся их дискретный поворот. Время турбоабразивной обработки назначали исходя из ограничения по величине использованного ресурса пластичности. В результате были достигнуты необходимые свойства поверхностного слоя: $R_a = 0,2 \dots 0,3$ мкм, при исходной $R_a = 0,6 \dots 0,8$ мкм; $\sigma_{ocm} = -400 \dots -600$ МПа, при глубине распространения $60 \dots 80$ мкм. Отмеченный характер распределения сжимающих напряжений, в сочетании с достигнутой шероховатостью поверхности, дают приращение усталостной прочности лопаток компрессора с тонкими кромками на $15 \dots 20$ %.

Разработан также комбинированный процесс волочения танталовой проволоки и повышение её качества путём введения дополнительной операции обкатки [4]. Необходимая глубина внедрения шарика обеспечивается путём настройки обкатника и может быть определена из соотношения $2h_s / hR = 0,95 - 1,05$, где h_s – высота пластической волны. При диаметре проволоки 4 мм и радиусе обкатных шариков 1 мм рациональной оказалась глубина внедрения $h = 0,03 - 0,04$ мм. При увеличении глубины внедрения до значений $h > 0,05$ мм перед шариками образуется увеличенная пластическая волна, происходит разогрев материала, растрескивание и обдирка поверхностного слоя. Поэтому необходимое увеличение пластической проработки поверхностного слоя следует осуществлять увеличением числа проходов с рациональной глубиной внедрения.

Сформированная обкаткой геометрия поверхности проволоки, текстура, структура и механические свойства материала приводят к тому, что эффект упрочнения положительно сказывается при волочении даже после значительного числа переходов. Проволока, изготовленная с улучшением характеристик материала поверхностного слоя обкаткой, является более качественной, со значительно меньшей шероховатостью поверхности, при исключении обрывности в процессе волочения.

ВЫВОДЫ

Процессы локального пластического деформирования позволяют повышать служебные характеристики готовых изделий, а также заготовок под дальнейшую обработку давлением, путем формирования благоприятной структуры, уменьшения анизотропии исходных свойств материала и повышения его механических характеристик, создания благоприятных остаточных напряжений сжатия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвийчук В. А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов : монография / В. А. Матвийчук, И. С. Алиев. – Краматорск : ДГМА, 2009. – 268 с.
2. Краєвський В. О. Вплив технологічних параметрів на кінематику холодного торцевого розкочування / В. О. Краєвський, В. А. Матвійчук, В. М. Михалевич // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : зб. наук. пр. – Краматорськ – Слов'янськ, 2003. – С. 286–291.
3. Бусол Ф. И. Исследование вакуумной герметичности медных полуфабрикатов / Ф. И. Бусол, Б. П. Нат и др. // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. – 1979. – Вып. 1. – С. 7–18.
4. А. с. №1750766 СССР, МКИ В 21 С1/00. Способ изготовления проволоки преимущественно с анизотропными свойствами / В. А. Матвийчук, В. С. Гуменюк, В. Ф. Гоголя и др. (СССР). – № 4791358/27; заявл. 14.02.90; опубли. 30.07.92. Бюл. №28. – 1с.; ил.

Алиев И. С. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ОМД ДГМА;

Матвийчук В. А. – д-р техн. наук, проф. ВНАУ;

Махмудов К. Д. – канд. техн. наук, доц., директор Каспийского филиала ДагГТУ.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

ДагГТУ – Дагестанский государственный технический университет, г. Каспийск, Россия.

E-mail: matvvik@mail.ru