

УДК 621. 771

И.С. Алиев¹, д.т.н., проф., В.А. Матвийчук², д.т.н., проф.¹ – Донбасская государственная машиностроительная академия² – Винницкий торгово-экономический институт КНТЭУ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ОСНОВНИИ АНАЛИЗА НАПРЯЖЁННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ДЕФОРМИРУЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ

Проведено аналіз напружено-деформованого стану в зоні локалізації осередку деформування при поверхнево пластичному деформуванні, торцевому розкочуванні і вальцюванні. Досліджено вплив технологічних параметрів на накопичення пошкоджуваності в матеріалі заготовки і службові характеристики виробів.

The analysis of the strained-deformed state is made in the localization area of the deformation centre during superficial plastic deformation, expansion and rolling. The influence of technological parameters on the deformability accumulation in the billet material and service wares characteristics has researched.

Локализация очага деформации в процессах обработки металлов давлением (ОМД) позволяет изготавливать необходимые, в т.ч. крупногабаритные, изделия при относительно небольших усилиях деформирования и использовании оборудования малой мощности. Ограниченная площадь приложения усилий обуславливает гидростатический подпор пластической зоны со стороны прилегающих слоёв деформируемого материала, что создаёт благоприятное напряжённо-деформированное состояние (НДС) непосредственно в очаге деформации. Вместе с тем, НДС деформируемой заготовки в целом зависит от схемы деформирования и характера течения металла, обусловленного геометрией инструмента и активными силами трения на контакте.

К факторам, ограничивающим технологические возможности большинства локальных методов ОМД, относятся, прежде всего, разрушение деформируемого материала, потеря устойчивости заготовки и возникновение неблагоприятных контактных напряжений, снижающих стойкость инструментальной оснастки и возможность получения точных изделий. Кроме того, значительный интерес представляет решение проблемы обеспечения заданных служебных характеристик изделий, которые также преимущественно зависят от НДС и величины накопленных микроразрушений в деформируемом металле.

Целью данной работы является разработка путей развития и совершенствования локальных методов ОМД на основании анализа НДС, деформируемости металлов и оценки влияния на них основных технологических параметров.

Для анализа возможных путей совершенствования локальных методов ОМД были выбраны такие технологические процессы, как поверхностное пластическое деформирование (ППД), холодная торцовая раскатка (ХТР) и вальцовка тонкопрофильных компрессорных лопаток. Отмеченные процессы, очевидно, охватывают весь спектр возможного НДС материала заготовок при локальном деформировании: от деформаций, сосредоточенных у поверхности заготовки при ППД, до постепенно распространяющихся на весь деформируемый объём при ХТР, и до равномерно распределённых по всей толщине заготовки при вальцовке. Различными являются также форма заготовки и инструмента и характер их относительного движения. Поэтому проведенные исследования способствуют установлению общих закономерностей влияния технологических параметров на НДС и деформируемость материала заготовок при локальном деформировании.

Анализ НДС пластической области внедрения инструмента в заготовку для различных процессов локального деформирования осуществляли с использованием экспериментально-расчётных методов. Для исследования НДС зоны отпечатков, при вдавливании в заготовку шарика (осе симметричная задача) и ролика (плоская задача), использован метод координатных делительных сеток [1]. По результатам обработки экспериментальных данных в пластической области отпечатков были построены изолинии интенсивности деформаций ε_u , напряжений σ_u и показателя напряжённого состояния $\eta = 3\sigma / \sigma_u$, где σ - среднее напряжение (рис. 1).

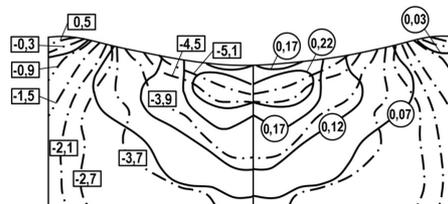


Рис.1. Характер распределения в пластической области отпечатка изолиний

$$\square \eta = \text{const}, \quad \circ \varepsilon_u = \text{const}$$

Анализ полученных результатов показал, что интенсивность деформаций на поверхности отпечатка составляет всего лишь 50-80% от максимальной, которая наблюдается вблизи оси симметрии отпечатка на глубине $h \approx 0,1d$ (где d – диаметр отпечатка). При произведении инженерных расчётов максимальную интенсивность деформаций в области отпечатка можно определить из соотношения $\varepsilon_u^{\text{max}} \approx (0,4 - 0,5)d / D$, а глубину пластической области – $h_\varepsilon = (1,4 - 1,6)d$,

где D – диаметр шарика. Таким образом, если необходимо сформировать тонкий, сильно упрочнённый слой, то следует использовать деформирующие тела малых диаметров с большей относительной глубиной их вдавливания, назначая много переходный процесс. При необходимости формирования умеренно упрочнённого поверхностного слоя большой глубины, следует назначать мало переходный процесс деформирования телами относительно больших диаметров.

В случае ХТР инструмент (цилиндрический или конический валок) имеет относительно большой диаметр и, вращаясь, деформирует заготовку в направлении, или под некоторым углом, к её продольной оси на значительную глубину. Характер распределения НДС в зоне контакта вала с заготовкой, полученный путём моделирования процесса высадки раскаткой на свинцовых заготовках бурта поляризационно-оптическим методом, представлен, для средней части высаживаемого бурта, на рис. 2. Таким образом, нормальные напряжения σ_x и σ_y в зоне контакта вала с заготовкой сжимающие. При этом напряжение σ_y изменяется от нуля на входе в контакт и на выходе из контакта, до значений $\sigma_y^{\max} = (2-3)\sigma_x$ в промежуточных точках дуги контакта. Показатель напряжённого состояния достигает значений $\eta = -2$ в зоне максимальных напряжений.

Расчет НДС материала заготовок при вальцовке тонкопрофильных компрессорных лопаток производили по результатам измерения координатно-делительной сетки и экспериментально полученных значений функций тока. Построение аппроксимаций функций тока, удовлетворяющих всем граничным условиям, а также определение по полученной кинематике деформирования напряжённого состояния, осуществляли с помощью методики, основанной на теории R-функций [1]. На рис. 3 представлен характер распределения значений ϵ_u и η в зоне очага деформации срединного продольного сечения лопатки с обжатием заготовки 35%.



Рис. 2. Кинограмма процесса раскатки а) и характер НДС вдоль дуги (l_g) контакта вала с заготовкой б)

Как следует с рис. 3, показатель η изменяется от величин $\eta = 1$ на входе в очаг деформации, до значений $\eta = -3 \dots -5$ в зоне наибольших обжатий. Деформации распространяются на всю толщину заготовки, однако на поверхности контакта наблюдаются застойные зоны, обусловленные контактным трением.

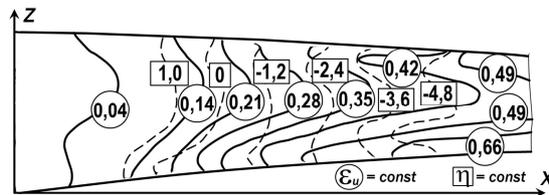


Рис. 3. Характер распределения НДС в очаге деформации продольного сечения середины заготовки при вальцовке

На основании проведенного исследования можно утверждать, что в целом для процессов локального ротационного деформирования характерна мягкая схема напряжённого состояния в зоне внедрения инструмента. Глубина распространения пластической области зависит от диаметра (ширины) отпечатка и, следовательно, размеров деформирующего инструмента и величины подачи. На НДС же всей заготовки определяющее влияние оказывает кинематика деформирования.

В случае ППД при смещении инструмента по поверхности происходит поэтапное превращение пластических валиков в лунки. При этом неоднородность деформаций вдоль поверхности заготовки сглаживается, однако по глубине характер деформированного состояния (рис. 4) соответствует одноэтапному вдавливанию.

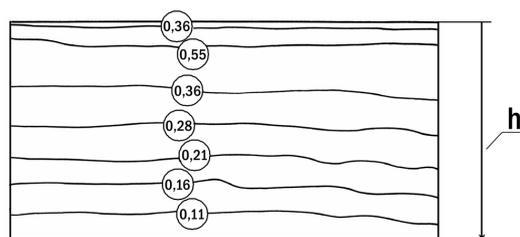


Рис. 4. Характер распределения интенсивности деформаций в упрочнённом поверхностном слое при ППД

Деформация при ППД является немонотонной. На основании повторения комбинации двухэтапного деформирования, определённой из анализа НДС отпечатков, с использованием тензорно-нелинейной модели накопления повреждений, получено соотношение для расчёта накопленного ресурса пластичности ψ_u при ППД [2].

Установление факта, что максимальное накопление деформаций, разуплотнение и разрушение металлов происходит на некоторой глубине под поверхностью изделия, определяет пути совершенствования процессов ППД. Для повышения служебных характеристик изделий необходимо ограничивать величину использованного ресурса пластичности и применять технологические приёмы, смещающие области с максимальной деформацией, а, следовательно, и с максимальной твёрдостью и остаточными сжимающими напряжениями, к поверхности. К таким приёмам можно отнести: использование на заключительных этапах ППД тел деформирования меньших размеров; использование эффективной смазки для уменьшения сил трения; обеспечение силы действия инструмента под углом к поверхности, для уменьшения размеров застойных зон; использование абразивных примесей для срезания образованных гребешков и приближения зон ε_u^{\max} к поверхности и пр.

На рис. 5 показан характер распределения интенсивности деформаций и напряжений в сечении сформованного высадкой методом ХТР бурта трубной заготовки, полученный с помощью метода измерения твёрдости. На распределение показателя η на свободной поверхности бурта (рис. 6), полученное методом сеток, существенно влияют активные силы трения, обусловленные величиной и направлением смещения δ вершины конического вала по отношению к центру вращения заготовки, а также углом наклона вала α . Их влияние усиливается с увеличением относительных размеров части заготовки под высадку раскаткой h_0/b_0 .

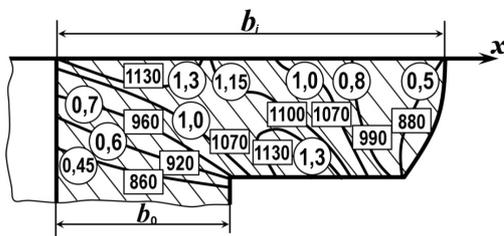


Рис. 5. Характер распределения в сечении наружного бурта трубчатой заготовки из стали 30ХГСА параметров $\varepsilon_u = const$, $\sigma_u = const$

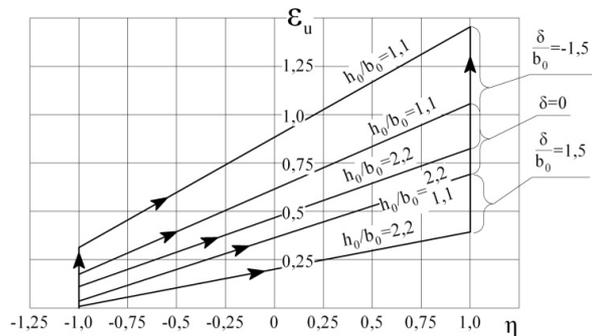


Рис. 6. Вид путей деформирования частиц материала свободной поверхности бурта в зависимости от технологических параметров ХТР

Для моделирования и исследования НДС в процессах ХТР был использован наиболее распространённый конечно-элементный пакет ANSYS|LS-DYNA [3]. Сравнение значений, полученных расчётным и экспериментальным путём, показало, что отличие формы бурта, характера распределения по его сечению интенсивности деформаций и значение показателя напряжённого состояния для частицы свободной поверхности бурта находятся в пределах погрешности, не превышающей 10-12% (рис. 7 и рис. 8).

Оценка деформируемости материала заготовок при раскатке [4] позволила определить предельные до разрушения размеры заготовки, а также величину использованного ресурса пластичности на промежуточных стадиях раскатки, для участков с ε_u^{\max} и свободной поверхности бурта.

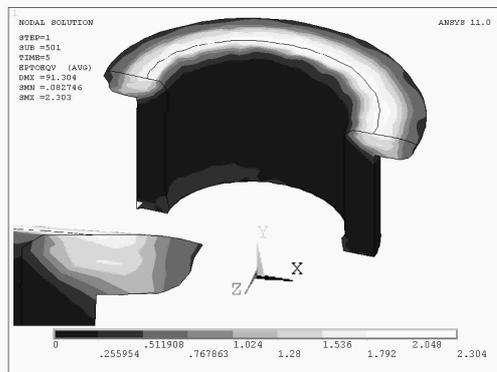


Рис. 7. Распределение интенсивности деформаций в сечении бурта, полученное МКЭ

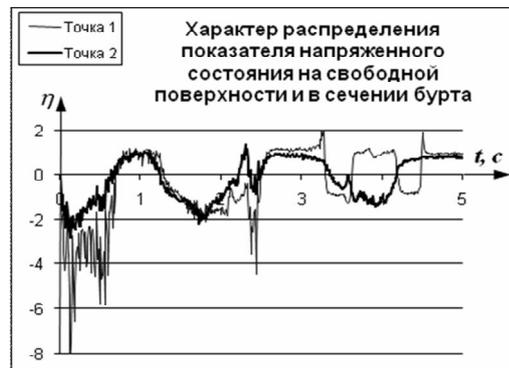


Рис. 8. Распределение показателя η на свободной поверхности и в сечении бурта (точки 1 и 2)

Вальцовка компрессорных лопаток относится к нестационарным процессам с локальным очагом деформации. Холодной вальцовке подвергаются трудно деформируемые малопластичные сплавы, что делает анализ НДС и оценку деформируемости материала заготовок особенно актуальным.

Исследование НДС на поверхности заготовок с помощью метода сеток показало, что его характер по перу заготовки лопатки существенно зависит от формы припуска. При эквидистантном припуске интенсивность деформаций в поперечном сечении имеет наибольшее значение у боковых кромок лопаток. Обжим в поперечном сечении начинается у кромок и распространяется к середине лопатки. Такой характер формоизменения создаёт гидростатический подпор течения металла. И хотя у кромок наблюдается наибольшая в поперечном сечении интенсивность деформаций, однако здесь имеет место относительно «мягкая» схема НДС ($\eta = -0,5 \dots -1,0$).

В случае пропорционального припуска, интенсивность деформаций в поперечном сечении заготовки распределяется равномерно. При этом внедрение валка начинается в средней части сечения, что приводит к первоначальному удлинению срединных по ширине участков заготовки. По мере увеличения степени обжатия, продольные напряжения от удлинения средней части заготовки достигают такого уровня, что вызывают растяжение частиц вблизи кромок. В итоге у кромок появляется полоска утяжки не контактирующего с валками металла ($\eta = 0,5 \dots 1,0$), на которой даже при незначительных степенях деформации возникают трещины (рис. 9, 10).

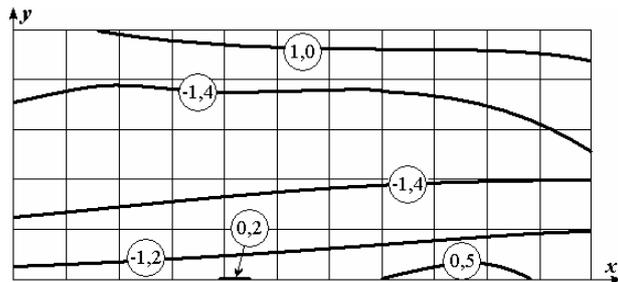


Рис. 9. Характер распределения показателя η по перу заготовки лопатки при вальцовке с пропорциональным припуском

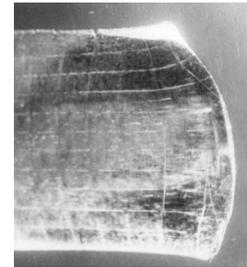


Рис. 10. Вид трещины вблизи кромки при вальцовке с пропорциональным припуском

В результате проведенной оценки деформируемости вальцуемых заготовок получены выражения для определения использованного ресурса пластичности [4]. Изготовленные вальцовкой заготовки испытывали на статический изгиб и выносливость. Испытания на изгиб подтвердили достоверность расчётов по определению остаточного ресурса пластичности при вальцовке. Испытаниями на выносливость установлено, что усталостные свойства материала сохраняются до значений $\psi \leq \psi^* \approx 0,4$. Поэтому наиболее нагруженные при эксплуатации участки лопатки, отстоящие на $1/3$ ее длины от замка, не должны превышать указанных значений.

В случае превышения отмеченных предельных значений использованного ресурса пластичности, следует проектировать много переходный процесс вальцовки, с назначением промежуточной термообработки. Согласно проведенным исследованиям, восстановительная термообработка полностью снимает накопленную поврежденность при величине использованного ресурса пластичности $\psi \leq 0,4$. Максимальный восстановленный ресурс пластичности для материала, деформированного до значений $\psi \geq 0,7$, составляет $\psi_B \approx 0,5$. Превышение значений $\psi > 0,75$ ведет к резкому увеличению остаточной поврежденности, не залечиваемой термообработкой.

Разработанные на основании проведенных исследований НДС и оценки деформируемости материала заготовок рекомендации, позволили интенсифицировать процессы ППД, ХТР и холодной вальцовки. Полученные в результате совершенствования процессов локального деформирования изделия обладают повышенными служебными характеристиками.

Выводы

В случае локального деформирования очаг внедрения инструмента в заготовку характеризуется «мягкой» схемой напряжённого состояния. Показатель напряжённого состояния изменяется от значений $\eta = -4 \dots -5$ в центре очага деформации, до $\eta = 0 \dots 1$ у его края. Основное накопление деформации происходит при отрицательных значениях показателя η . Однако при деформировании заготовки путём последовательного смещения локального очага деформации, напряжённое состояние всего деформируемого объёма существенно зависит от формы заготовки и действия активных сил трения на контакте. Изменяя технологическую схему, форму припуска и направление активных сил трения на контакте инструмента с заготовкой, можно избежать появления утяжек и обеспечить гидростатический подпор, необходимый для замедления процесса накопления поврежденности материала.

Список литературы

1. Рвачёв М. А. Применение метода R-функций для экспериментально-расчётного исследования напряженного состояния и деформируемости в осесимметричных процессах ОМД / М. А. Рвачёв, В. Д. Покрас // Изв. вузов. Чёрная металлургия. 1991. - №11. - С. 59-60.
2. Матвийчук В. А. Анализ деформируемости металлов при поверхностном упрочнении деталей / В. А. Матвийчук, В. П. Егоров, В. М. Михалевич, В. Д. Покрас // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993 - №10. - С. 10-13.
3. Матвийчук В. А. Моделирование высадки торцевой раскаткой наружных буртов на трубных заготовках / В. А. Матвийчук, Л. И. Алиева, С. И. Сухоруков // Обработка материалов давлением: сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, №2 (21) - 2009. – С. 46-51.
4. 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.