



УДК 621.7.011

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕКОНТАКТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

Нго Као Кьонг

INVESTIGATION OF OUTSIDE CONTACT DEFORMATION UNDER THE LOCAL LOADING

Ngo Cao Cuong

Аннотация. На основе теории малых упругопластических деформаций и метода конечных элементов построена математическая модель процесса упрочнения, позволяющая определять размеры пластической волны внеконтактной деформации. Рассмотрены влияния различных факторов на размеры волны: диаметра шарика, глубины внедрения, материала образца и направление действующей силы. Выявлено влияние нескольких типов конструкций деформирующих инструментов на напряженно-деформированное состояние модели и величину пластической волны вне зоны нагружения.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние; внеконтактная деформация; пластическая волна; упруго-пластическая деформация; стесненная деформация.*

Abstract. The mathematical model of hardening process is built based on the small elastic deformation theory and the finite element method, which allows to define dimensions of waves outside plastic deformation contact. Considering the influences of different factors on the dimensions of the waves: ball diameter, depth of penetration, different materials, direction of forces and the influences of several types of the deforming tool on the stress and strain state of the model and the amount of plastic out of the influenced area.

Keywords: *the stress and strain state; outside contact deformation; plastic wave; elastic-plastic deformation; constrained deformation.*

Состояние вопроса

Для повышения качества деталей машин широкое применение в технологических процессах машиностроения нашли методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Обкатывание шариком, роликом, диском и другими инструментами снижает шероховатость поверхностного слоя, повышает его прочность, формирует остаточные напряжения сжатия. В результате применения процессов ППД повышаются износостойкость, контактная выносливость и в итоге долговечность изделий возрастает в 5-10 раз [1].

При внедрении рабочего инструмента в поверхность упрочняемой детали возникает внеконтактная деформация в результате формирования пластических волн материала вокруг рабочего инструмента.

Таким образом, реальная поверхность изменения формы нагруженного тела отличается от геометрической формы очага деформации (ОД). При упругопластическом деформировании материал заготовки перемещается не только в направлении рабочего инструмента, но и в обратном, выходя из очага деформации в виде наплыва, который называют волной пластического течения или сокращенно "волной". Внеконтактная деформация приводит к формированию пластических волн вокруг инструмента. Следовательно, поверхностный слой при обработке ППД формируется в результате пластического течения не только в контактных, но и во внеконтактных зонах очага деформации.

Металл поверхностного слоя детали, попадая под деформирующую часть рабочего инструмента, находится в состоянии всестороннего сжатия. Следуя закону наименьшего сопротивления, металл течет из области максимального давления в область минимального давления, т.е. в область, не подвергающуюся действию инструмента. Течение металла в сторону обкатанной поверхности является нежелательным, так как при этом повышается шероховатость поверхности и возникает волнистость [4].

Наличие волны следует считать отрицательным фактором, так как она увеличивает зону контакта в очаге деформации, повышает трение, уменьшает поступление технологической смазки, снижает усталостную прочность материала, поскольку возникающие в волне растягивающие напряжения способствуют развитию микродефектов (микротрещин). Поэтому в процессе упрочнения необходимо стремиться к уменьшению размеров волны.

Исследование профиля очага деформации в теории ППД отражено лишь в нескольких работах, посвященных, главным образом, исследованию формы и размеров площадки пластического контакта. По-видимому, наиболее раннее наблюдение волны, возникающей при ППД, выполнили Н. Konig, а затем Н.М. Деньщик. Ими отмечена зависимость высоты волны от технологических факторов [3].

Причиной малочисленных исследований пластической волны во внеконтактных зонах деформирования являются ее весьма малые геометрические размеры, для определения которых требуются высокоточная измерительная техника. На смену трудоемких исследований пришли методы компьютерного моделирования, которые при в некоторых случаях позволяют получить достаточно точные результаты, сопоставимые или даже превышающие точность экспериментальных данных.

Постановка задачи

В работе рассматривается влияние параметров и условий нагружения на изменение основных размеров пластической волны, а также возможность устранения ее в процессе деформации. Процесс упругопластического деформирования рассмотрен на модели объемного тела, в которое внедряется жесткий шар.

Для процессов деформирования пластического полупространства форма и размеры контактных и внеконтактных зон ОД зависят от технологических факторов, с одной стороны, и являются свидетелями механических процессов, проходящих в ОД, с другой. К сожалению, в настоящее время в силу чисто математических трудностей не удается решить задачу ППД с определением границ ОД. Для определения размеров волны от условий нагружения при внедрении шара в упругопластический материал был использован программный комплекс ANSYS, предназначенный для решения задач в различных областях инженерной деятельности [5].

Взаимодействие индентора с пластическим полупространством сопровождается образованием вокруг инструмента пластических наплывов – волн (рис.1).

Очаг деформации (на рис. 1. заштрихован) ограничивается в плоскости симметрии контактной площадью ВС, двумя внеконтактными поверхностями АВ и СД и границей между деформированной и недеформированной зонами ДЕА. Для оценки размеров волны использованы два параметра: h – высота и l – длина волны.

Для проведения расчетов в среде ANSYS была построена геометрическая модель в виде упругопластического блока (20x20x20 мм) и полушара радиусом 5мм и контакта между ними. Материал блока (образца) сталь Ст45 ($\sigma_T = 360$ МПа).

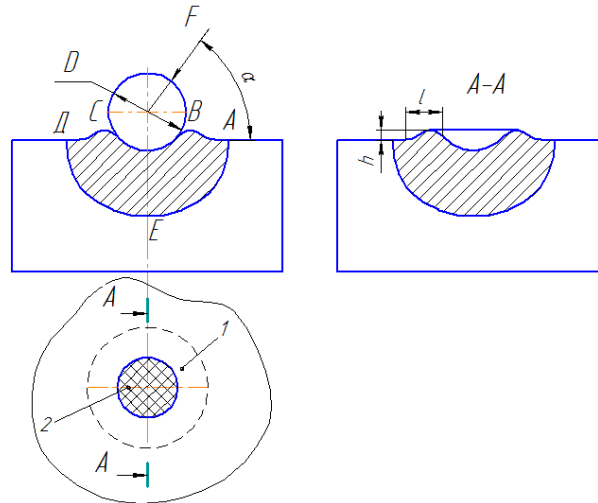


Рисунок 1 – Форма очага деформации в сечении главной плоскости при внедрении шарика в пластическое полупространство: 1 – область образования волны, 2 – область пластического отпечатка

Результаты компьютерного моделирования и расчетов

В данной работе рассмотрена зависимость размеров волны от параметров нагружения. На рис. 2 представлена зона контактной и внеконтактной деформации при внедрении шара на глубину 1 мм в стальное тело. На рис. 3 – 6 приведены кривые изменения размеров волны в зависимости от глубины внедрения, радиуса шара, марки материала и направления действующей силы.

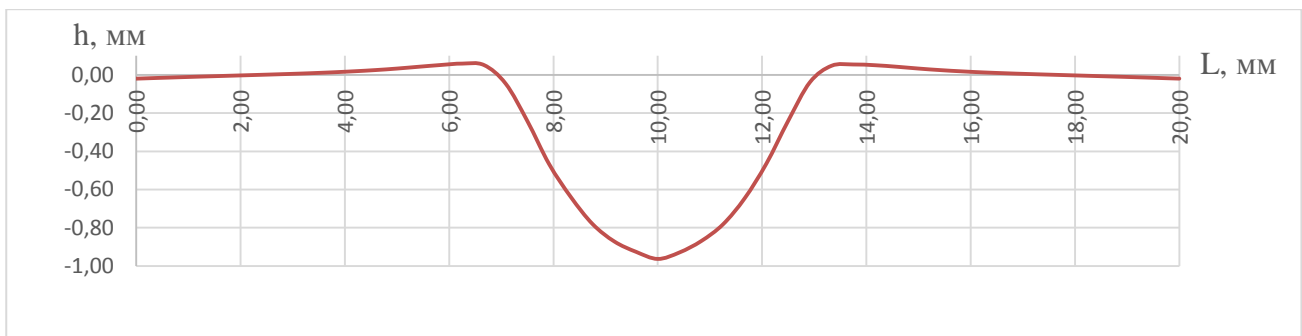


Рисунок 2 – Геометрия контактной и внеконтактной деформации при внедрении шара диаметром 10 мм на глубину 1 мм

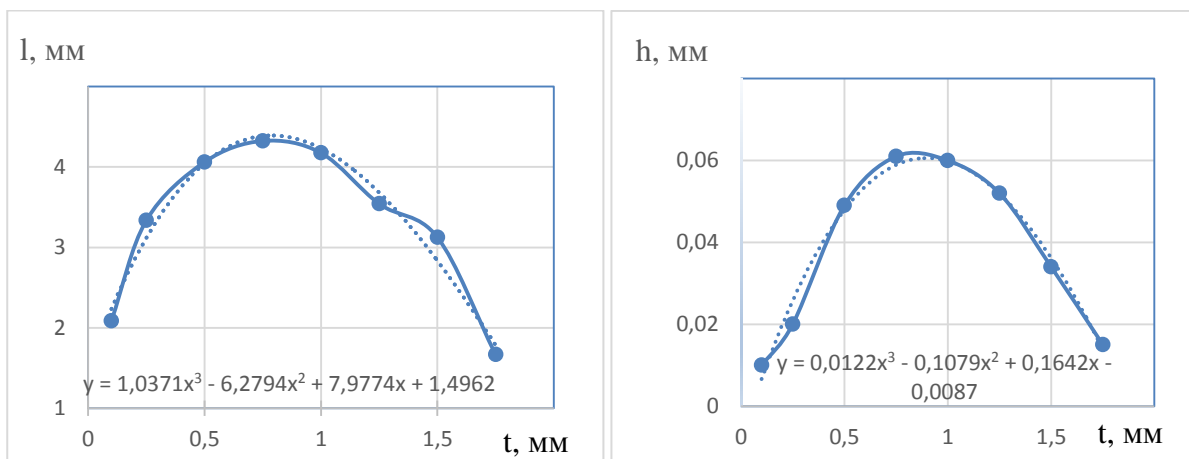


Рисунок 3 – Зависимость длины (l) и высоты (h) волны от глубины внедрения шара (диаметр шара 10мм)

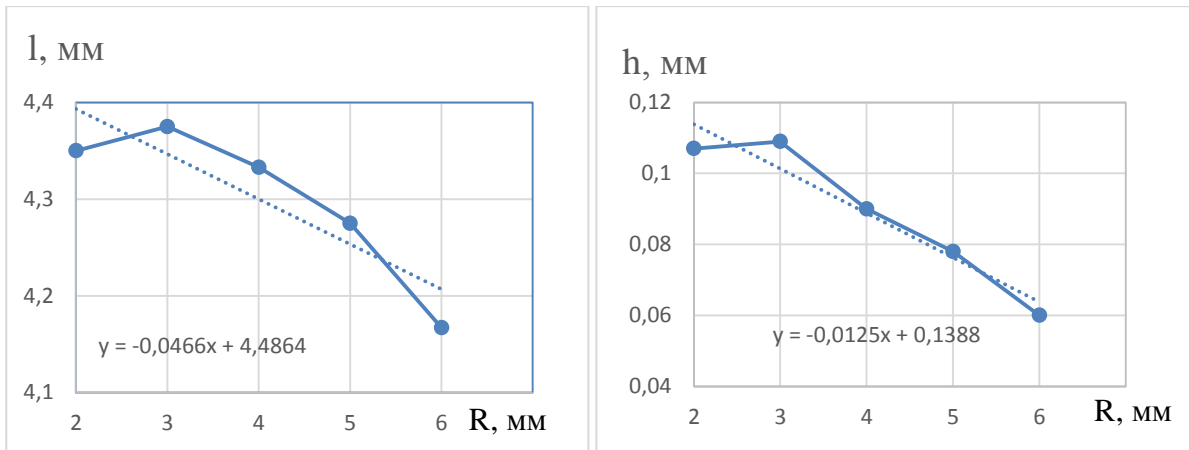


Рисунок 4 – Зависимость длины (l) и высоты (h) волны от радиуса шара (глубина внедрения 1 мм)

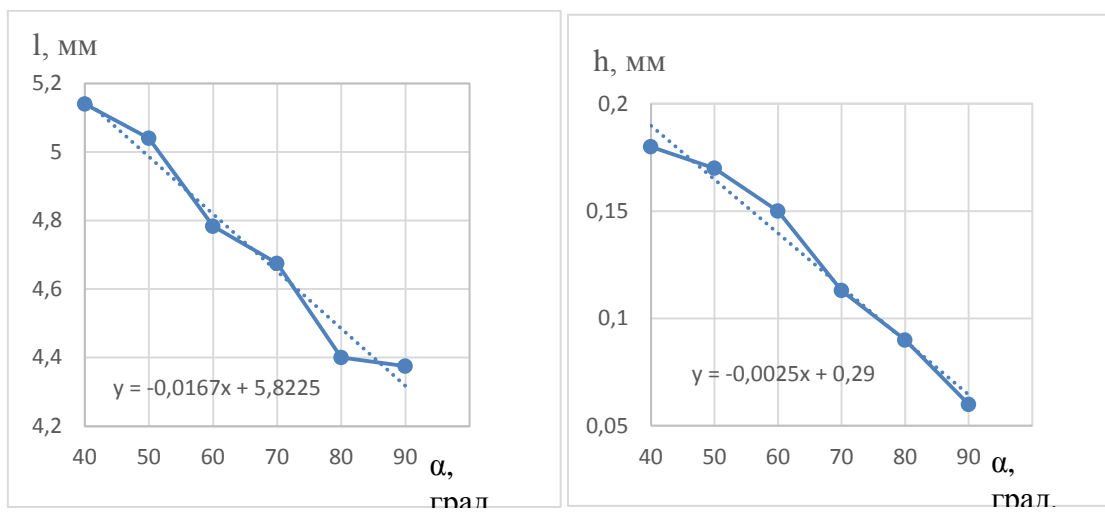


Рисунок 5 – Зависимость длины (l) и высоты (h) волны от направления действующей силы (угол α отсчитывается от горизонтальной линии)

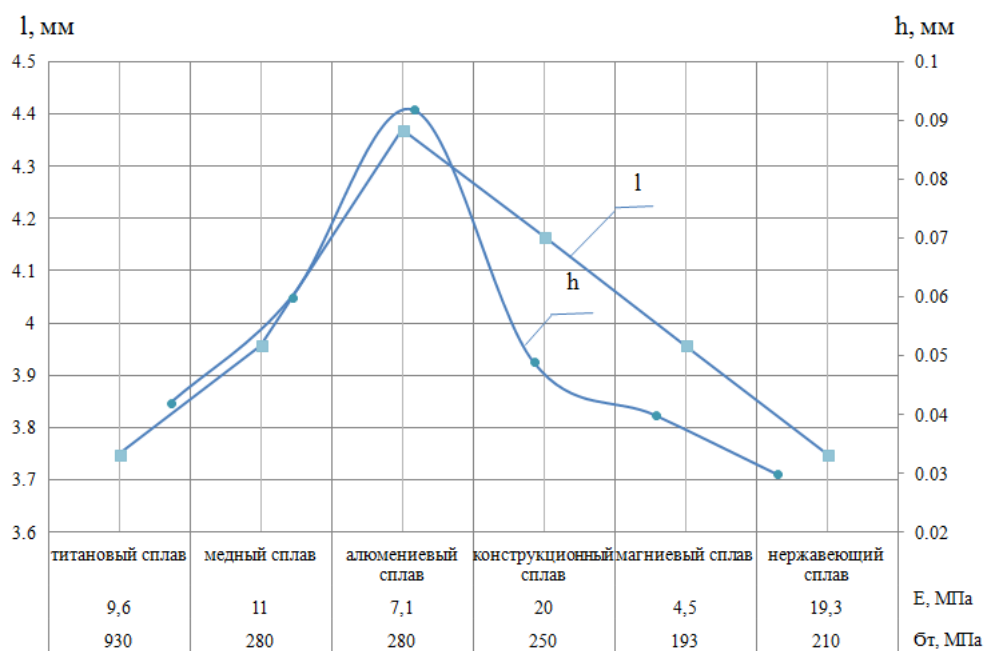


Рисунок 6 – Зависимость длины (l) и высоты (h) волны от физико-механических свойств материала

Обсуждение результатов

С увеличением глубины внедрения шара (рис. 3) частицы металла испытывают постоянное повышение напряженного состояния. При этом происходит непрерывное накопление деформации и исчерпание запаса пластичности частиц металла. При превышении некоторой допустимой глубины внедрения (в наших опытах $t \approx 0,7 - 0,8$ мм) происходит увеличение прочности металла, исчерпание запаса пластичности и уменьшение размеров волны. Таким образом, линейные размеры волны при упругопластическом деформировании позволяют косвенно оценить исчерпание запаса пластичности поверхностного слоя.

При постоянной глубине внедрения рабочего инструмента с увеличением диаметра деформирующего элемента размеры волны уменьшаются (рис. 4). Это можно объяснить тем, что с увеличением диаметра шара возрастают размеры контактной площадки, которая поднимает поверхностный слой и препятствует росту пластической волны. Шар меньших размеров образует фронт деформации, который стремится выдавить металл на свободную поверхность, что и повышает размеры пластической волны.

Полученные результаты показывают, что выбирая и назначая размер деформирующего инструмента при поверхностном упрочнении, технолог должен учесть и размеры внеконтактных зон, которые при этом формируются.

Наибольшее влияние на формирование пластической волны внеконтактной деформации оказывает направление внешней силы (рис. 5). При этом с увеличением угла наклона силы (α), размеры волны постепенно уменьшаются и достигают минимальных значений при угле $\alpha = 90^\circ$ от горизонтали. Так, при угле $\alpha = 90^\circ$ высота волны в 3 – 4 раза меньше, а длина волны на 20% меньше чем при угле, например, $\alpha = 40^\circ$.

Полученные данные позволяют объяснить ряд явлений при внеконтактном деформировании, например, роль смазки на формирование упругопластической волны. При проектировании обкатников и раскатников так же необходимо учитывать, что изменение направления результирующей нагрузки окажет влияние и на размеры волны, а следовательно, и на качество поверхностного слоя.

На рис. 6 показана зависимость размеров волны от физико-механических свойств упрочняемого материала. При одинаковом пределе текучести $\sigma_m = 280$ МПа (алюминиевый сплав и медный сплав) с увеличением модуля упругости размеры волны уменьшаются. Это справедливо для магниевого сплава и нержавеющей стали. С увеличением предела текучести материала наблюдается тенденция к уменьшению высоты и длины волны внеконтактной деформации.

Подавление пластических напылов при локальном нагружении

Для рассмотрения этого вопроса обратимся к деформации в стесненных условиях.

Под стесненной деформацией понимают, процесс, происходящий в ограниченных условиях закрепления или нагружения. Стесненные условия нагружения приводят к увеличению интенсивности деформации. При наличии стесненных условий меняется характер перемещений и деформаций изделия [2].

Стесненные условия деформирования еще не получили широкого распространения и являются новым направлением совершенствования технологических процессов машиностроения. Известны работы, например, [2,6], по разработке технологии правки маложестких валов и осей в стесненных условиях нагружения и работа [7] по снижению утонения при использовании формоизменяющих операций листовой штамповки.

Постановка задачи

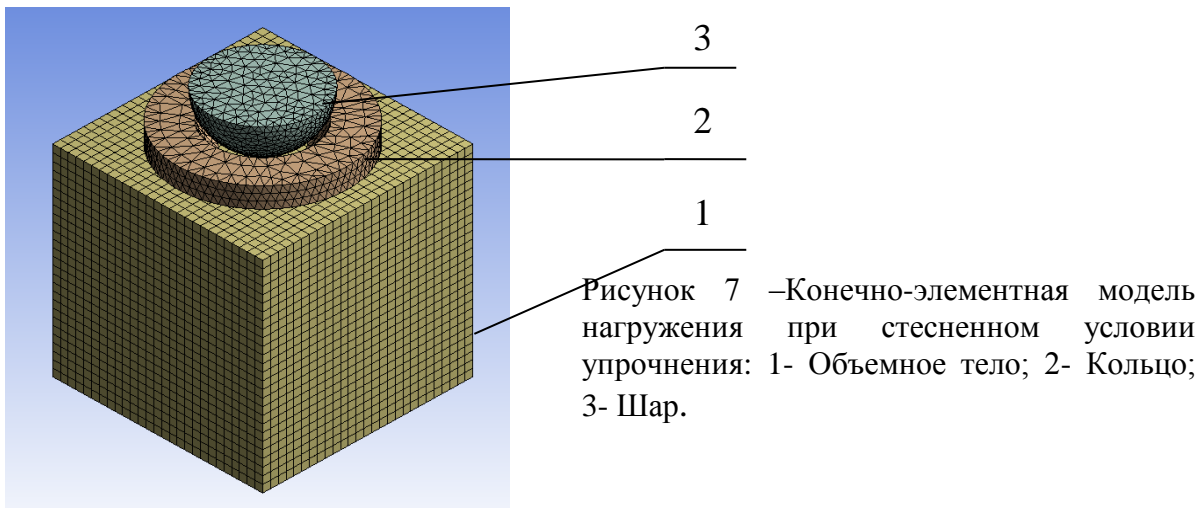
Пластическая волна при внедрении шара в поверхность объемного упругопластического тела образуется благодаря свободной поверхности, которая позволяет воспринимать обратное внеконтактное течение металла из очага деформации. Если наложить ограничение на это пластическое течение, то условие деформирования металла при внедрении шара должны измениться и оказать влияние на изменение механических свойств.

В работе рассматривается возможность создания стесненных условий при локальном деформировании путем уменьшения размеров пластической волны внеконтактной деформации.

Постановка машинных экспериментов

Расчеты, выполненные в работе, позволили выявлять размеры пластической волны при внедрении шара на глубину 1 мм в стальное тело. Они составили: длина волны 4,73 мм, высота 0,06 мм (рис. 3).

Для устранения формирования волны при пластическом течении металла предлагается использовать жесткое кольцо, ширина которого соответствует длине волны, а внутренний диаметр обеспечивает внедрение шара на заданную глубину (в наших опытах 1 мм). Это кольцо плотно прижимается к поверхности тела, и в него внедряется шар. После этого шар и кольцо снимаются, и происходит разгрузка металла. Для усиления эффекта подавления пластической волны были выполнены расчеты при вдавливании кольца на глубину 0,02 мм, что соответствует величине волны и кольца с выпуклой поверхностью, которая зеркально отражает форму поперечного сечения волны высотой 0,06 мм. Конечноэлементная модель схемы нагружения представлена на рис. 7.



Для оценки напряженно-деформированного состояния в разных точках по глубине модели определяли эквивалентное напряжение ($\sigma_{\text{экв}}$ – Mises) и нормальные напряжения по осям Oz , Ox , Oy . Критерий напряжения по Мизесу основывается на теории Мизес-Хенки (Mises-Hencky), также известной как теория энергии формоизменения. При использовании главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 , напряжение по Мизесу $\sigma_{\text{экв}}$ вычисляется как [5]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

После проведения моделирования полученные результаты расчета представлены в таблице.

Обсуждение результатов

В таблице представлены результаты расчета влияния схемы нагружения на напряженно-деформированное состояние материала образца и геометрические параметры волны. Выявлено, что при свободном нагружении упруго-пластического тела шаром формируется пластическая волна наибольших размеров при минимальных значениях эквивалентного напряжения, которое косвенно характеризует степень упрочнения материала.

Таблица - Результаты моделирования и расчета

Способы упрочнения	$\sigma_{\text{экв}}$ МПа	$\sigma_z^{\text{ост}}$ МПа	$\sigma_{y,x}^{\text{ост}}$ МПа	Размеры волны, мм	
				h мм	l мм
Без кольца	385	-218	-584	0,06	4,735
С наложением кольца на поверхность	417	-233	-627	0,02	3,955
Вдавление кольца на глубину 0,02 мм	427	-223	-630	0,003	1,042
Вдавление кольца с выпуклой поверхностью на глубину 0,06 мм	439	-224	-634	0	0

Наложение ограничений на пластическую внеконтактную деформацию изменяет напряженно-деформированное состояние нагруженного тела. Так, при воздействии плоского кольца на зону образования пластической волны происходит снижение ее высоты в 3 раза, и на 20 % уменьшается длина волны. При вдавлении плоского кольца на глубину, равную высоте волны (0,02 мм), ее размеры существенно снижаются: высота в 20 раз, а длина почти в 5 раз.

Наилучшие результаты получены и при вдавлении кольца с выпуклой поверхностью: пластическая волна практически исчезает. Анализ результатов моделирования показывает, что размеры очага деформации зависят от размеров и формы упрочняющего инструмента. Использование комбинированного инструмента в виде шара с кольцом позволяет практически полностью подавить образование пластической волны и повысить интенсивность напряженного состояния на 10 – 15 %.

Как видно из таблицы, с помощью кольца произошла интенсификация напряженного состояния в очаге деформации. Полученные результаты можно объяснить тем, что кольцо с шаром можно считать как двойной деформирующий элемент. Поэтому очаг деформации в зоне внедрения представляет собой перекрытие очагов деформации двух инструментов и их слияние в один комплексный очаг. Наличие кольца меняет естественное течение материала. При этом металл поверхностного слоя образца находится в условиях сложного напряженного состояния, испытывает интенсификацию напряжений, что приводит к уменьшению размеров пластической волны.

Выводы

1. С помощью программного пакета ANSYS на основе метода конечных элементов разработана расчетная математическая модель процесса внедрения деформирующего инструмента в поверхность объемного тела. Основные исследования проведены при изучении наиболее важных параметров волны внеконтактной деформации: ее высоты и длины.

2. Установлено влияние различных факторов (диаметра шара, глубины внедрения, обрабатываемого материала, направления действующей силы и поверхностного слоя) на размеры пластической волны внеконтактной деформации. При этом установлено:

- существует глубина внедрения деформирующего инструмента, при которой размеры волны имеет максимальные значения;
- при неизменной глубине внедрения рабочего инструмента с увеличением его диаметра размеры волны уменьшаются;
- наибольшее воздействие на изменение размеров волны оказывает направление действующей силы. Так, при увеличении направления силы от 40^0 до 90^0 от горизонтали высота волны уменьшается в 3– 4 раза, а ее длина уменьшается почти на 20%;



- размеры пластической волны зависят от физико-механических свойств материала: с увеличением модуля упругости и предела текучести материала размеры волны уменьшаются;

3. Представленные результаты моделирования и численного расчета напряженно-деформирования состояния при внедрении жесткого шара в упругопластическое тело показывают высокую эффективность использования стесненных условий деформирования как для подавления процесса пластического внеконтактного формообразования, так и для изменения напряженного состояния деформированного тела.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Деформирующая обработка валов: монография / С.А. Зайдес, В.Н. Емельянов, М.Е. Попов и др. / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. 452 с.
2. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: ИрГТУ, 2001. 312 с.
3. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
4. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. Киев: Наук. думка, 1981. 288 с.
5. Басов К.А. Ansys: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
6. Способ правки длинномерных цилиндрических изделий и правильная машина для его осуществления / С.А. Зайдес, Д.А. Журавлёв; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет. № 96111479/02; заявл. 06.06.96. опубл. 27.07.98, Бюл. № 21.
7. Ершов В.И., Глазков В.И., Каширин М.Ф. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки, М.: Машиностроение, 1990. 311 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Нго Као Кыонг

ФГБОУ ВПО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск, Россия, аспирант кафедры машиностроительных технологий и материалов ИРНТУ,

Email: cuong.istu@gmail.com.

Ngo Cao Cuong

FSEI HPE «Irkutsk National Research Technical University», Irkutsk, Russia, Postgraduate of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Materials,

Email: cuong.istu@gmail.com.

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИрНТУ, Кафедра. МТМ, каб. Е105. Нго Као Кыонг.
8(9246) 38-73-72