

ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ НА РАЗМЕРЫ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ РОТАЦИОННОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Зайдес С.А., Та В.Т.Т.

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск*

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, сегментированный ролик, внеконтактная деформация, упругопластическая волна, физико-механические свойства материала, напряженно-деформированное состояние.

Аннотация. Исследовано влияние физико-механических свойств материалов на размеры упругопластических волн при ротационном поверхностном пластическом деформировании сегментированным роликом. Численное моделирование для сталей и сплавов показало, что с увеличением модуля упругости и предела текучести размеры волн уменьшаются. Полученные зависимости высоты и длины волн от механических характеристик материалов могут использоваться при выборе рациональных режимов упрочнения.

INFLUENCE OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WORKPIECE MATERIALS ON THE DIMENSIONS OF ELASTOPLASTIC WAVES DURING ROTARY SURFACE PLASTIC DEFORMATION

Zaides S.A., Ta V.T.T.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk

Keywords: surface plastic deformation, segmented roller, non-contact deformation, elastic-plastic wave, physical and mechanical properties of the material, stress-strain state.

Abstract. The influence of the physical and mechanical properties of materials on the dimensions of elastoplastic waves during rotary surface plastic deformation using a segmented roller was investigated. Numerical simulation for steels and alloys showed that the wave dimensions decrease with increasing Young's modulus and yield strength. Relationships between the wave height and length and the mechanical characteristics of materials were obtained, which can be used for selecting rational strengthening regimes.

Введение

Ротационное поверхностное пластическое деформирование (ППД) является эффективным методом повышения качества и эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей машин [1, 2]. При обработке материалов возникают упругопластические волны, размеры которых оказывают существенное влияние на формирование упрочнённого слоя и качество поверхности. Характер распространения таких волн определяется физико-механическими свойствами материала, прежде всего модулем упругости и пределом текучести [3]. Поэтому исследование влияния данных характеристик на параметры упругопластических волн является актуальной задачей для совершенствования процессов ротационного ППД.

Цель работы: исследование влияния физико-механических свойств материала деталей на размеры упругопластических волн при ротационном ППД сегментированным роликом.

Задачи работы: выполнить численное моделирование процесса ротационного ППД для разных сталей и сплавов. Исследовать влияние модуля упругости и предела текучести на размеры упругопластических волн. Получить зависимости геометрических параметров волн от физико-механических свойств материалов.

Схема ротационного поверхностного пластического деформирования

Схема ППД цилиндрических деталей типа валов и осей представлена на рисунке 1. Заготовка совершает вращательное движение относительно собственной продольной оси, а инструменту, содержащему деформирующие элементы и оказывающему радиальную силу прижатия на поверхность обрабатываемой заготовки, сообщают продольную подачу. Как видно из схемы обработки, параметрами, определяющими кинематику технологического процесса, являются частота вращения заготовки ($n_{заг}$), продольная подача ($S_{пр}$), радиальная сила прижатия (F), частота вращения рабочего инструмента ($n_{ин}$). В действительности ролик достаточно плавно катится по заготовке, но при моделировании необходимо задать частоту вращения ролика, которая зависит от частоты вращения заготовки и соотношения радиуса ролика к радиусу заготовки.

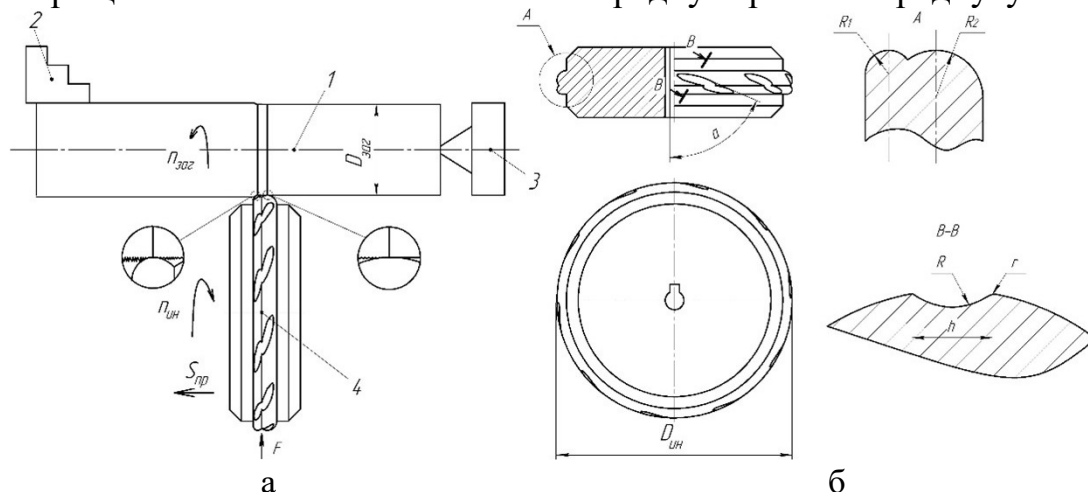


Рис. 1. Схема ротационного поверхностного пластического деформирования (а) и геометрия сегментированного ролика (б): 1 – заготовка; 2 – трехкулачковый патрон; 3 – центр задней бабки; 4 – сегментированный ролик

Сегментированный ролик (рис. 1б) имеет асимметричную форму деформирующих элементов, состоящих из двух профильных радиусов разного размера, причем меньший профильный радиус R_1 расположен на фронтальной стороне ролика, а больший профильный радиус R_2 расположен на тыльной стороне ролика. Торговая поверхность ролика разбита на сектора, зоны раздела которых находятся под углом α к центральной оси инструмента и представляют собой канавки шириной h , которые проходят через два профильных радиуса, при этом расстояние между центрами профильных радиусов составляет l .

Компьютерное моделирование ротационного процесса ППД

Для оценки параметров инструмента и напряженно-деформированного состояния (НДС) применён метод конечных элементов в ANSYS Workbench (модуль Transient Structural) с неявной квазистатической постановкой. Материал заготовки описан билинейной упругопластической моделью, ролик принят как абсолютно жёсткое тело.

Контакт «инструмент–заготовка» задан методом Augmented Lagrange с трением ($f = 0,15$) и автоматической адаптацией жёсткости. Использована гексаэдрическая сетка с шагом 0,2 мм в зоне контакта; модель включает 75253 элементов и 15503 узлов. Геометрия инструмента формируется автоматически в программе.

Для определения НДС при моделировании использованы базовые режимы упрочнения: Частота вращения заготовки $n_{заг} = 100$ об/мин; диаметр заготовки $D_{заг} = 20$ мм; частота вращения инструмента $n_{ин} = 40$ об/мин; продольная подача рабочего инструмента $S_{пр} = 0,1$ мм/об; радиальная сила прижатия $F = 900$ Н.

Для построения компьютерных моделей сегментированного ролика использованы следующие параметры: Диаметр сегментированного ролика $D_{ин} = 50$ мм; меньший профильный радиус $R_1 = 1$ мм; больший профильный радиус $R_2 = 2$ мм; расстояние между вершинами профиля $l = 2$ мм; радиус скругления разделительной канавки $r = 2$ мм; количество деформирующих элементов $n = 10$ штук; ширина разделительной канавки $h = 2$ мм; угол наклона разделительной канавки $\alpha = 60$ градусов.

Под воздействием рабочего инструмента в пластическом пространстве цилиндрической заготовки формируются пластические наплывы в виде волн (рис. 2) как в направлении продольной подачи, так и в направлении главного движения. Указанные волны характеризуются двумя основными геометрическими параметрами – высотой h и длиной волны l .

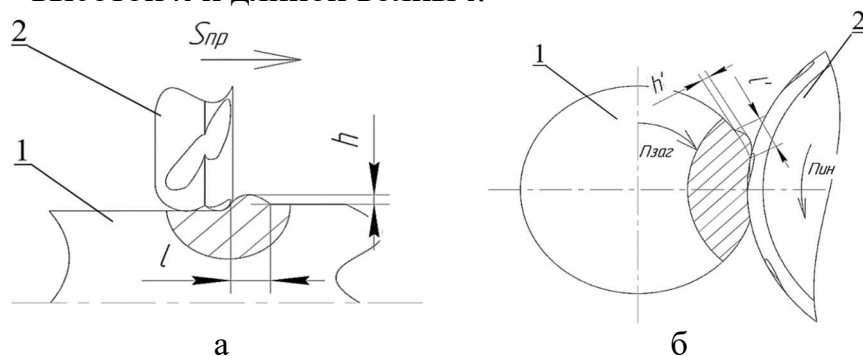


Рис. 2. Формы упругопластических волн при ротационном ППД: 1 – заготовка; 2 – сегментированный ролик; а) в направлении подачи б) в направлении главного движения

Установлено, что независимо от технологических параметров и режимов упрочнения размеры волны в направлении продольной подачи в 2-2,5 раза превышают размеры волны в направлении главного движения [4]. В связи с этим настоящая статья посвящена исследованию морфологии волны пластической деформации в направлении продольной подачи, выявлению факторов, оказывающих наибольшее влияние на её развитие, а также обоснованию подходов, позволяющих корректно оценивать форму и геометрические параметры волны.

Результата моделирования

Результаты моделирования показывают (рис. 3) что параметры упругопластических волн при внеконтактной деформации тесно связаны с физико-механическими характеристиками материалов, особенно с их пределами упругости и текучести. Большие размеры волн наблюдаются у материалов, имеющих низкий модуль упругости (магниевого сплав МА12, алюминиевый

сплав АМг6Н). Установлено, что с увеличением значения модуля упругости и предела текучести материала, линейные размеры упругопластических волн снижаются. Это связано с тем, что материал становится более жестким и менее податливым к пластическому течению: при воздействии рабочего инструмента деформация концентрируется преимущественно в зоне контакта, а продольное смещение материала, ответственное за формирование волны, ограничено. В результате высота и длина упругопластических волн уменьшаются. Для мягких материалов с низкими значениями модуля упругости и предела текучести, таких как алюминиевые или магниевые сплавы, пластическая деформация распространяется более широко, что приводит к образованию более высоких и протяженных волн. Напротив, у материалов с высоким модулем упругости и пределом текучести, например, у нержавеющей стали, волны деформации имеют минимальные размеры.

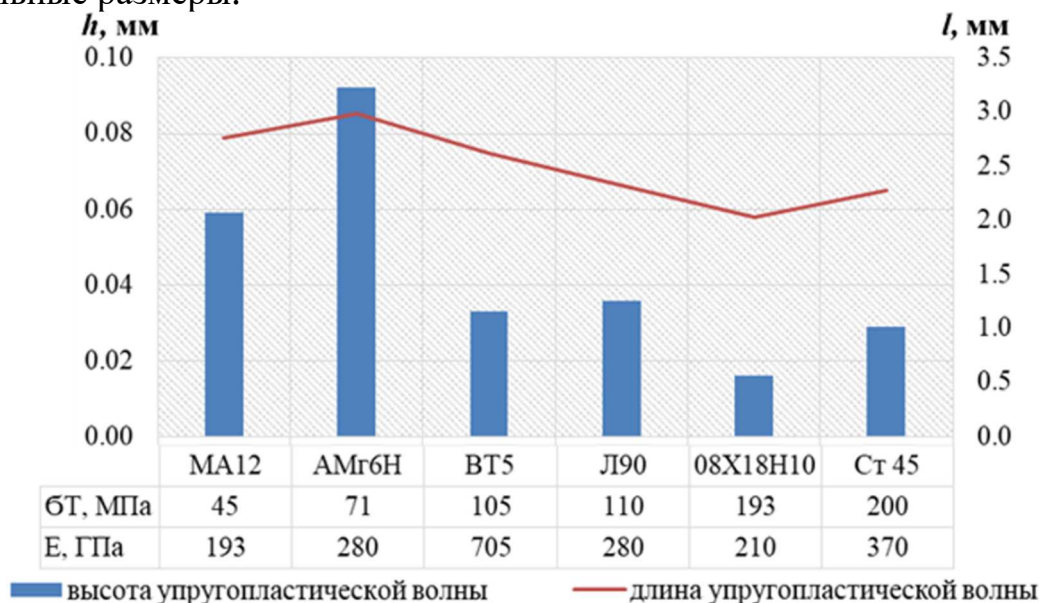


Рис. 3. Влияние физико-механических свойств металла на размеры волн при ротационном ППД

Максимальные размеры волны формируются при обработке сплава АМг6Н, минимальные получаются у нержавеющей стали 08Х18Н10. Полученные результаты моделирования позволяют установить соотношение между размерами упругопластических волн: $h = (0,01...0,03)l$.

На рисунке 4 представлены зависимости геометрических размеров упругопластических волн от физико-механических свойств металлов. Из анализа рисунка 4 следует, что линейные размеры упругопластической волны находятся в закономерной зависимости от предела текучести и модуля упругости материала. Результаты численного моделирования показывают, что при увеличении предела текучести и модуля упругости наблюдается уменьшение высоты и длины упругопластической волны, тогда как при снижении указанных характеристик размеры зоны внеконтактной деформации возрастают. Полученные зависимости позволяют описать влияние физико-механических свойств металлов на формирование упругопластической волны и могут быть использованы при выборе рациональных режимов ротационного ППД с целью минимизации её геометрических размеров и повышения качества упрочнённой поверхности.

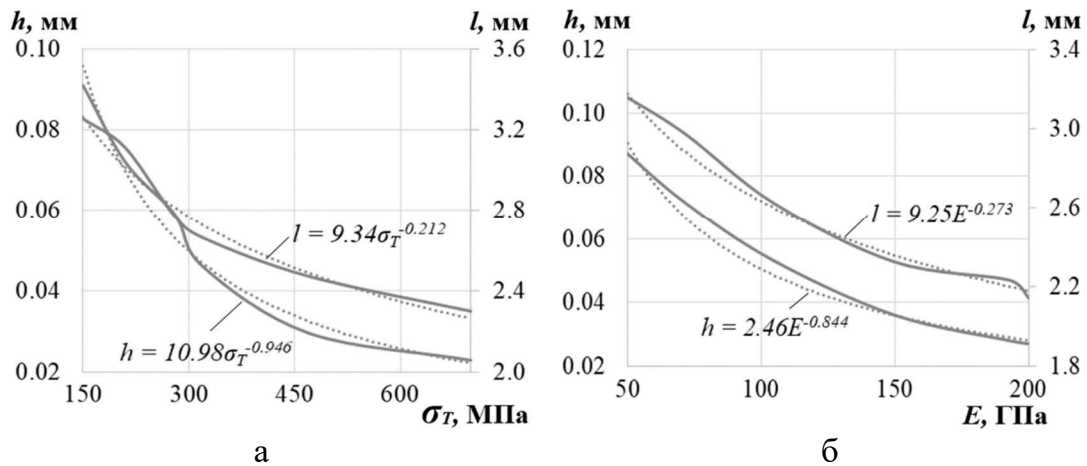


Рис. 4. Зависимость размеров упругопластических волн от предела текучести (а) и модуля упругости (б) материала

По полученным результатам моделирования, можно описать зависимости размеров упругопластических волн от физико-механических свойств металлов. Зависимость от предела текучести: $h = 10,98\sigma_T^{-0,946}$; $l = 9,34\sigma_T^{-0,212}$. Зависимость от модуля упругости: $h_1 = 2,46E^{-0,844}$; $l_1 = 9,25E^{-0,273}$.

Заключение

Выполнено численное моделирование процесса ротационного ППД сегментированным роликом для разных сталей и сплавов, отличающихся физико-механическими характеристиками. Установлено, что размеры упругопластических волн при внеконтактной деформации определяются главным образом модулем упругости и пределом текучести материала.

С увеличением модуля упругости и предела текучести линейные размеры упругопластических волн уменьшаются вследствие повышения жесткости материала и локализации пластической деформации в зоне контакта инструмента. Максимальные размеры упругопластических волн наблюдаются при обработке алюминиевого сплава АМг6Н, а минимальные – у нержавеющей стали 08Х18Н10. Для исследованных материалов установлено соотношение между высотой и длиной упругопластической волны: $h = (0,01...0,03)l$.

Список литературы

1. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. Справочник по процессам поверхностного пластического деформирования / Под ред. Зайдес С.А. Т. 1. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2021. – 504 с.
3. Зайдес С.А., Куан Х.М. Внеконтактная деформация при маятниковом поверхностном пластическом деформировании конструкционной стали // Чёрные металлы. – 2022. – №9. – С. 55-60. – DOI: 10.17580/chm.2022.09.09.
4. Dzionk S., Scibiorski B. The characteristics of the surface structure obtained in a low plasticity burnishing process in which the jumping wave occurred // Scientific Reports. 2025, vol. 15, pp.17644. DOI: 10.1038/s41598-025-02449-2.

Сведения об авторах:

Зайдес Семен Азикович – д.т.н., профессор кафедры материаловедения сварочных и аддитивных технологий;

Та Ван Тиен Тханг – аспирант.