

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №2 (140). С. 8-14.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №2 (140). P. 8-14.

Научная статья
УДК 621.787.4
doi:10.30987/2223-4608-2023-2-8-14

Оценка величины упругой разгрузки при маятниковом поверхностном пластическом деформировании

Семен Азикович Зайдес¹, д.т.н.,
Минь Куан Хо², аспирант

^{1,2} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

¹ zsa@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-7750-7497>

² minhquanho2605@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0488-0290>

Аннотация. Определена упругая разгрузка упрочненного слоя при маятниковом поверхностном пластическом деформировании. Приведены расчеты с помощью компьютерного моделирования Ansys 19.1 по определению влияния основных технологических параметров и режимов маятникового ППД на величину подъема металла, которая позволяет установить действительную величину натяга и обеспечить точность диаметральных размеров упрочненных деталей. Приведена зависимость величины упругого подъема упрочненного слоя от физико-механических свойств материала.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, секториальный рабочий инструмент, пластическая деформация, подъем металла, внеконтактная деформация

Для цитирования: Зайдес С.А., Хо Минь Куан Оценка величины упругой разгрузки при маятниковом поверхностном пластическом деформировании // Научноёмкие технологии в машиностроении – 2023. – № 2 (140). – С. 8-14. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-8-14.

Original article

Value elasticity estimation in pendulum surface plastic deformation

Semyon A. Zaides¹, Dr.Sc.Tech.,
Minh Kuan Ho², postgraduate student

^{1,2} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹ zsa@istu.edu, ² minhquanho2605@gmail.com

Abstract. The elasticity of the hardened layer under pendulum surface plastic deformation is determined. Calculations are given using computer modeling Ansys 19.1 to estimate the influence of the main technological parameters and modes of pendulum SPD (Surface plastic deformation) by the amount of metal rate of upward gradient, which makes it possible to establish the actual amount of tension and ensure the accuracy of the diametrical dimensions of the hardened parts. The dependence of the elastic rise of the hardened layer on the physical and mechanical properties of the material is given.

Keywords: surface plastic deformation, sectorial working tool, plastic deformation, metal rate of upward gradient, non-contact deformation

For citation: Zaides S.A., Ho Minh Kuan Value elasticity estimation in pendulum surface plastic deformation. / Science intensive technologies in engineering, 2023, no. 2 (140), pp. 8-14. doi: 10.30987/2223-4608-2023-2-8-14.

Введение

При изготовлении деталей машин обычно используют технологические процессы, основанные на удалении части материала (механическая обработка резанием) или на перераспреде-

лении металла в объеме тела (обработка давлением). Если после обработки резанием стабильность формы и размеров практически сохраняется, то после обработки давлением объем детали несколько изменяется в результате

так называемого процесса разгрузки [1].

При больших пластических деформациях величина упругой разгрузки весьма мала по сравнению с деформациями и обычно входит в величину поля допуска на размер изготавливаемого изделия. При малых пластических деформациях, которые имеют место в процессах поверхностного пластического деформирования, величина упругой разгрузки может уже влиять на достижение точности обрабатываемого размера, так как указанные процессы обычно назначают для деталей повышенной точности. В этом случае при настройке рабочего инструмента необходимо учитывать величину упругой разгрузки. Особенно актуален этот вопрос в тех случаях, когда необходимо изготавливать деформирующий инструмент замкнутого рабочего контура (дорны, матрицы), от размеров которого зависит точность, например, отверстия при дорновании или точность наружного диаметального размера при охватывающем деформировании [2].

При обработке металлов давлением происходит накопление потенциальной энергии за счет упругих и пластических деформаций. После прекращения внешнего воздействия на заготовку необратимые пластические изменения остаются, а обратимые упругие деформации исчезают, то есть упругие искажения материала возвращаются в исходное состояние. Можно предположить, что чем больше величина работы, совершаемая при пластическом деформировании металла, чем интенсивнее происходят дислокационные процессы, тем больше потенциальной упругой энергии накапливается при обработке, тем выше будет и величина упругой разгрузки [3].

В настоящее время в Иркутском национальном исследовательском техническом университете ведутся работы по разработке новых способов отделочно-упрочняющей обработки [4, 5] на основе поверхностного пластического деформирования (ППД). Целью этих разработок является повышение напряженно-деформированного состояния в очаге упруго-пластической деформации за счет использования более сложной кинематики деформирующего инструмента. Расчетные и экспериментальные результаты, выполненные в работах [6, 7] показали, что при более сложной кинематике технологического процесса происходит повышение механических свойств обрабатываемого материала, что непосредственно влияет на рост потенциальной энергии, а, следовательно, и на величину упругой разгрузки.

Очаг упруго-пластической деформации

при ППД обычно состоит из двух зон: зона непосредственного контакта рабочего инструмента с деталью и зона внеконтактной деформации, которая происходит вне зоны контакта рабочего инструмента с обрабатываемой поверхностью. Таких зон внеконтактной деформации бывает два вида. Первый вид представляет собой упруго-пластическую волну, которая формируется перед рабочим инструментом. Второй вид формируется после рабочего инструмента и представляет собой подъем поверхностного слоя металла в результате упругой разгрузки [8]. В данной работе рассмотрен второй вид внеконтактной деформации, который имеет место при маятниковом ППД.

В связи с вышеизложенными проблемами информация о величине подъема металла является немало важной задачей при создании нового способа ППД. Исходя из этого, целью данной работы является определение величины упругой разгрузки в зависимости от основных параметров и режимов маятникового ППД, которая позволит установить действительную величину натяга, а, следовательно, обеспечить точность диаметального размера цилиндрических деталей после обработки ППД.

Маятниковое поверхностное пластическое деформирование

Для обеспечения интенсификации напряженного состояния в очаге деформации, которое позволит снизить величину радиального натяга при обработке нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей, был разработан новый способ ППД [4], основанный на маятниковом воздействии секториального рабочего инструмента (рис. 1). Особенность новой кинематики деформирующего инструмента заключается в том, что поверхностное пластическое деформирование осуществляется за счет поочередных процессов качения и скольжения рабочего инструмента.

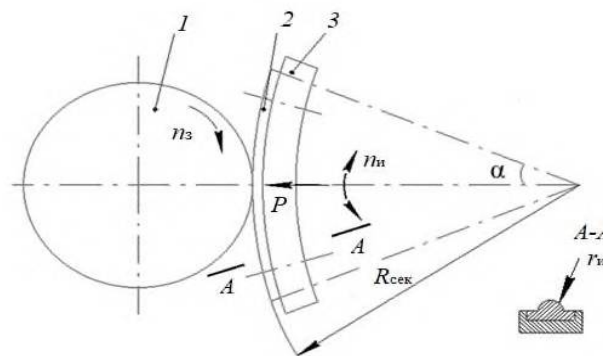


Рис. 1. Кинематическая схема маятникового ППД
1 – заготовка; 2 – деформирующий элемент; 3 – рабочий сектор инструмента

Моделирование маятникового ППД

Для определения размеров волны и подъема металла в поверхностном слое при воздействии секториального рабочего инструмента был использован программный комплекс Ansys 19.1, который позволяет эффективно решать различные задачи в сфере инженерной деятельности с использованием теории прочности и физики твердых тел [9, 10].

Для проведения расчетов в программе Ansys была построена геометрическая модель в виде упругопластического цилиндра и рабочего инструмента с секториальным и рабочим радиусами, соответственно $R_{сек}$, $r_{и}$.

Характеристики цилиндрического образца: в качестве заготовки был использован цилиндр диаметром $D_{заг} = 20$ мм; материал – конструкционная сталь 45 – упругопластическая, упрочняющаяся, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; диаграмма деформирования материала – билинейная (предел текучести $\sigma_T = 360$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1,45 \cdot 10^3$ МПа).

Характеристики инструмента: круговой сектор с радиусом скругления на цилиндрической поверхности; материал – ВК8, модуль упругости $E = 6 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

При помощи CAD/CAE системы Ansys 19.2 конечно-элементная форма цилиндрического образца создана со следующими параметрами: 7241 конечный элемент, 42624 узла; сетки квадратной формы; коэффициент трения в зоне контакта принят $\eta = 0,1$. Маятниковое ППД моделировалось с базовыми параметрами, представленными в табл. 1.

Следует отметить, что для выявления закономерности изменения геометрических размеров пластических волн, образующихся при внеконтактной деформации, была выбрана завышенная величина натяга ($t = 1,0$ мм), которая в производственной практике применяется весьма редко. Расчетная завышенная величина натяга позволит также обосновать его реальное значение, которое используется на практике.

1. Значения базовых параметров упрочнения

n_3 , об/мин	$n_{инь}$, ДВ.Х/МИН	t , мм	s , мм/об	$r_{и}$, мм	$R_{сек}$, мм	α , град
100	100	1,0	0,1	5	25	30

Результаты компьютерного моделирования и расчетов

Рассмотрим степень изменения величины подъема металла (Δ) в зависимости от технологических параметров и режимов маятникового поверхностного пластического деформирования

(ППД). Очаг деформации в направлении подачи при маятниковом ППД, представленный на рис. 2, показывает, что процесс упругопластической деформации более интенсивно происходит в зоне перед рабочим инструментом по сравнению с зоной за инструментом.

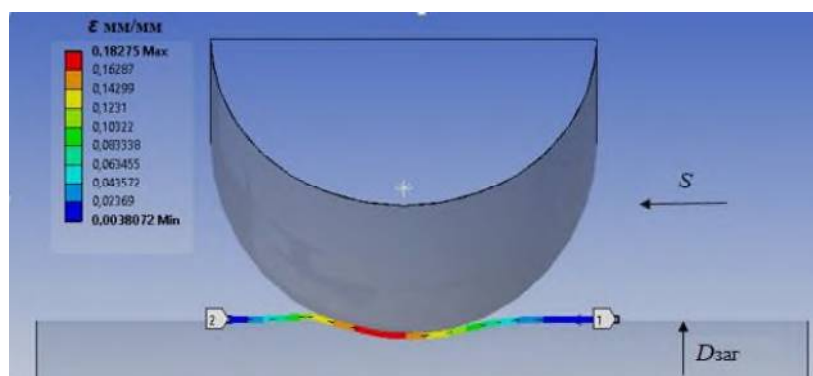


Рис. 2. Распределение интенсивности деформации в направлении подачи при маятниковом ППД

Зоны контактной и внеконтактной деформации в процессе маятникового ППД показаны на рис. 3. Очевидно, что при непосредственном воздействии рабочего инструмента в зоне контакта происходит пластическое течение металла, которое сопровождается формированием на поверхностном слое упругопластических волн. После перемещения рабочего

инструмента упругая деформация исчезает, что приводит к снижению линейных размеров упругопластической волны до некоторой постоянной величины, которая представляет собой степень подъема металла (Δ). Слева от рабочего инструмента в направлении подачи образуется волна высотой h' , а справа небольшая волна высотой h (см. рис.3).

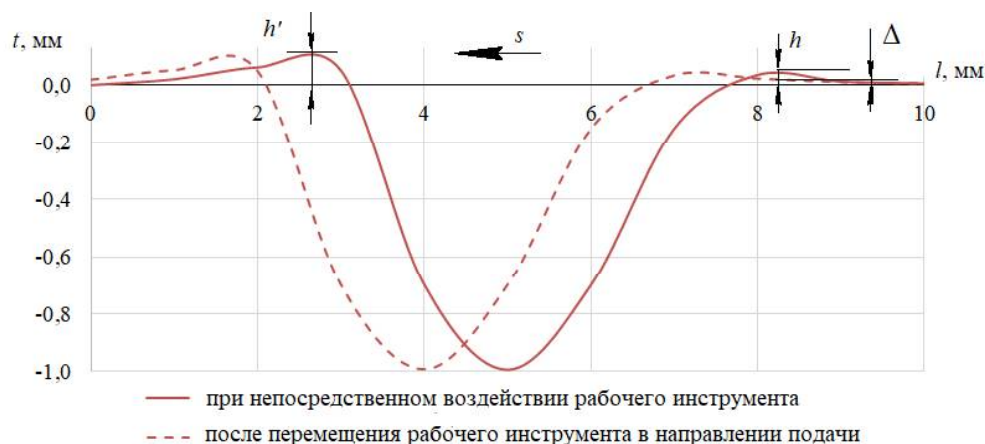


Рис. 3. Очаг внеконтактной деформации при маятниковом ППД

Зависимость высоты упругопластической волны (h) и величины подъема металла (Δ) от величины натяга t во внеконтактной зоне деформации показана на рис. 4, а. Следует отметить, что при малом значении величины натяга ($t = 0,1 \dots 0,2$ мм) подъем металла (Δ) небольшой и составляет $1,3 \dots 2,3$ мкм. Величина подъема металла (Δ) достигает максимума (около 45 мкм) при наибольшем значении вы-

соты h (при $t = 0,5 \dots 0,6$ мм). При дальнейшем увеличении натяга подъем металла плавно уменьшается. Это объясняется тем, что при величине натяга более 0,5 мм (при обработке углеродистых сталей) обычно происходит перенаклеп, материал охрупчивается, что приводит к снижению пластических процессов в зоне деформации.

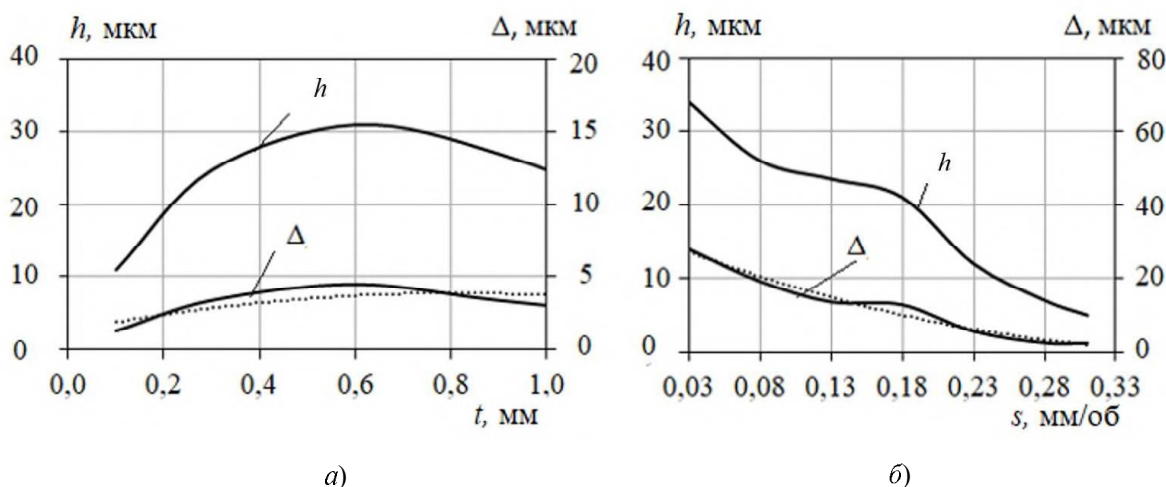


Рис. 4. Зависимость высоты волны h и величины подъема металла (Δ):
а – от величины натяга; б – от величины подачи

Зависимость величины подъема металла от величины натяга можно описывать следующим выражением:

$$\Delta = -0,004t^2 + 0,0065t + 0,0013 \quad (1)$$

Влияние продольной подачи на высоту волны и величину подъема металла показано на рис. 4, б. Установлено, что с увеличением продольной подачи от 0,03 до 0,33 мм/об высота упругопластической волны (h) и величина подъема металла (Δ) уменьшаются. При подаче s свыше 0,33 мм/об величина внеконтактной деформации приближается к нулю.

Влияние частоты вращения заготовки и частоты маятникового движения инструмента на высоту волну и на величину подъема металла представлено на рис. 5, а и рис. 5, б. Можно сделать вывод о том, что высота упругопластической волны практически не изменяется в данном диапазоне частоты вращения заготовки и частоты маятникового движения инструмента. При этом подъем металла составляет примерно $2,2 \dots 2,3$ мкм.

Зависимость величины подъема металла от угловой амплитуды рабочего инструмента по-

казана на рис. 5, в. Следует отметить, что при увеличении угловой амплитуды от 5° до 30° высота волны и подъем металла непрерывно уве-

личивается, а при $\alpha > 30^\circ$ высота волны, а следовательно, и подъем металла снижаются.

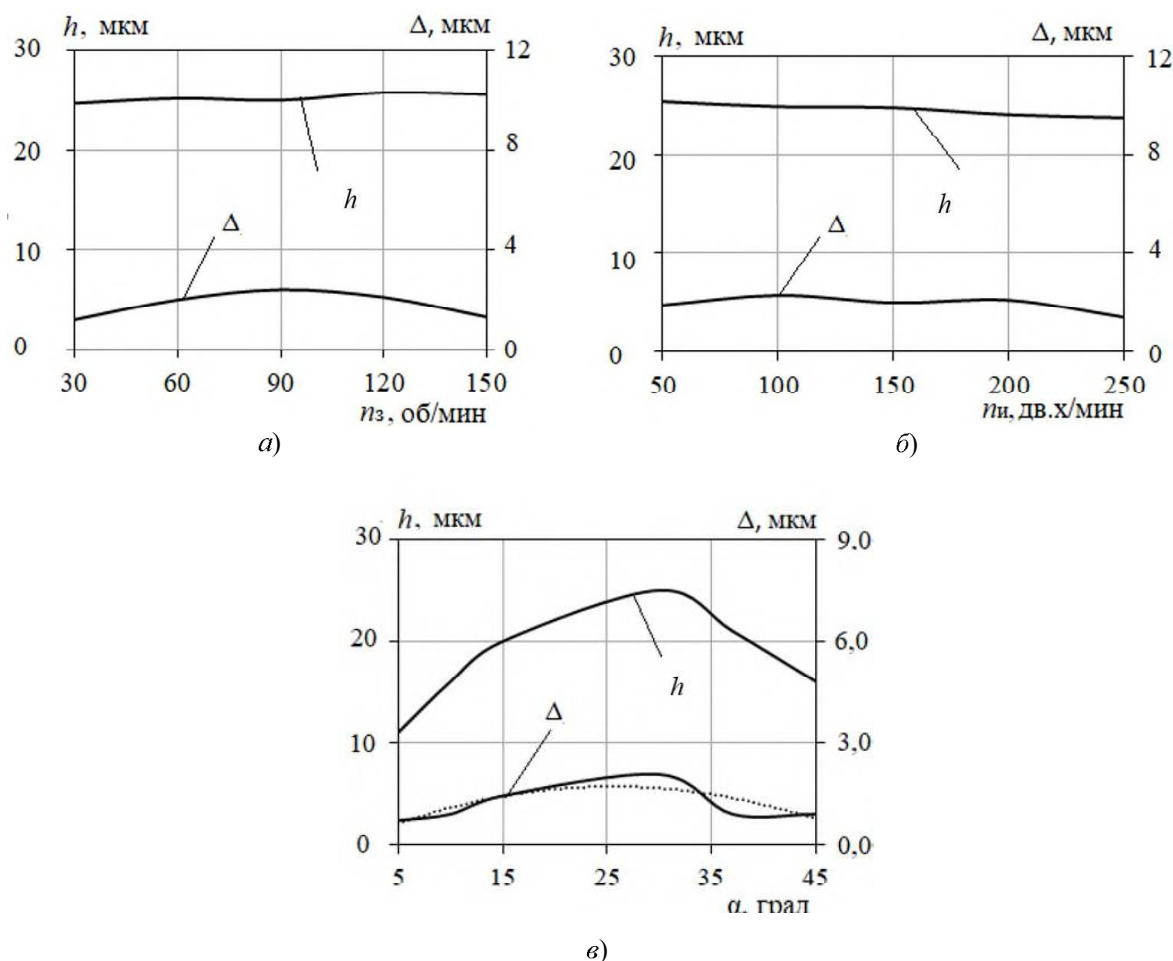


Рис. 5. Зависимость высоты волны h и величины подъема металла (Δ) от:
а – частоты вращения заготовки; б – частоты маятникового движения инструмента; в – угловой амплитуды инструмента

Для того чтобы ответить на вопрос: в каких случаях следует учитывать величину подъема металла после маятникового ППД, были выполнены расчеты Δ для некоторого

диапазона диаметра заготовки (табл. 2) при величине натяга $t = 0,1$ мм и $t = 0,2$ мм, которые достаточно широко применяются на практике.

2. Влияние внеконтактной деформации на точность диаметральных размеров (при $t = 0,1$ и $0,2$ мм)

Диаметр заготовки $D_{\text{заг}}$ (мм)	Величина внеконтактной деформации,* (мкм)		Интервал номинальных размеров (мм)	Числовые значения полей допусков (мкм)		
	h	Δ		Квалитет		
10	17,2...21,3	1,8...2,5	от 6 до 10	1	1,5	2,5
20	11,2...18,8	1,3... 2,3		от 18 до 30	1,5	2,5
40	11,1...15,3	1,2...1,9	от 30 до 50	1,5	2,5	4
60	11,1...15,1	1,1...1,7				

(*): первые числа соответствуют натягу $t = 0,1$ мм, вторые – $t = 0,2$ мм

Из табл. 2 следует, что при упрочнении заготовок диаметрами от 10 до 20 мм подъем металла (Δ) сопоставим с точностью диаметральных размеров по квалитету 2, 3, а при обработ-

ке заготовок диаметрами 40...60 мм подъема металла (Δ) сопоставим с точностью по квалитету 1. Таким образом, при изготовлении достаточно точных деталей необходимо учитывать

величину подъема металла (Δ) после ППД, особенно если используется деформирующий инструмент с замкнутым контуром рабочего профиля.

Для выявления закономерности изменения

ния высоты волны и величины подъема в зависимости от физико-механических свойств материала после маятникового ППД, выполнены расчеты для некоторых черных и цветных металлов (рис. 6).

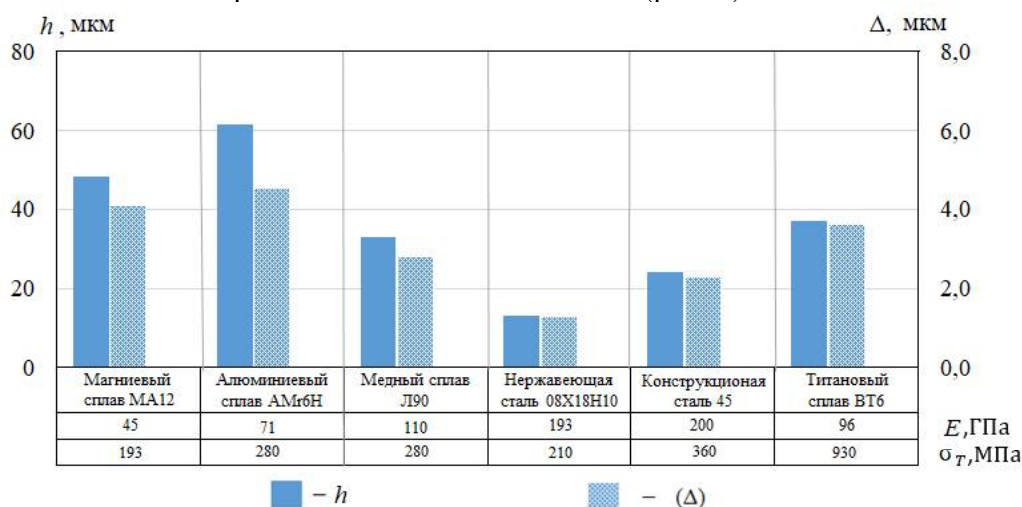


Рис. 6. Влияние физико-механических свойств металла на величину подъема (при базовых режимах обработки)

Влияние на высоту волны и на величину подъема металла оказывают физико-механические характеристики материала, что следует из рис. 6. Наибольшее значение высоты волны и величины подъема имеют материалы с низким модулем упругости (магнийевый сплав МА12, алюминиевый сплав АМг6Н). Меньшая величина подъема металла наблюдается при обработке нержавеющей (08Х18Н10) и конструкционных сталей (сталь 45).

Исследуя внеконтактную деформацию при маятниковом ППД, была выявлена не-

большая волна, возникающая за рабочим инструментом. Ее зависимость от высоты волны, возникающей перед инструментом показана на рис. 7, а. Численные расчеты показывают, что она почти в 1,5 – 2 раза меньше волны перед инструментом. Влияние высоты волны перед инструментом на подъем металла, из которого следует, что величина подъема упрочненного слоя в 15 – 20 раз меньше высоты волны h' перед рабочим инструментом, представлено на рис. 7, б.

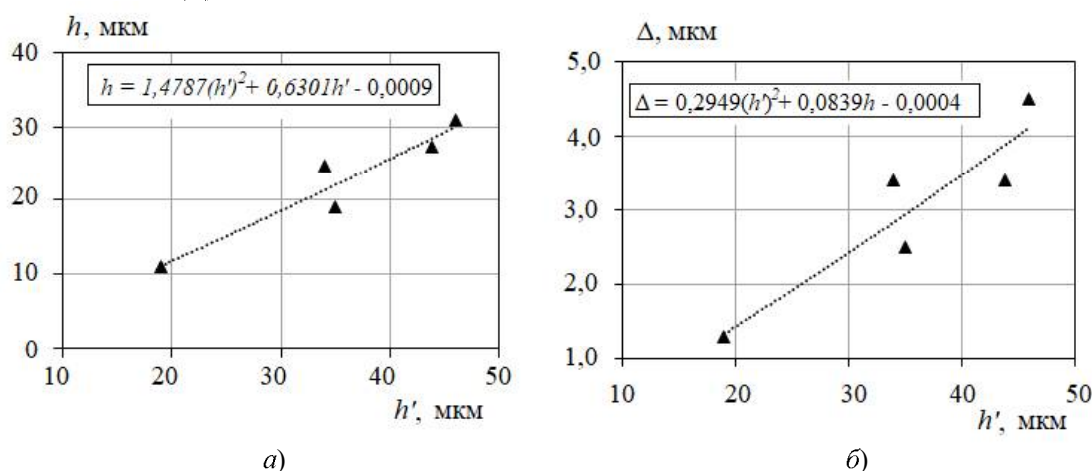


Рис. 7. Соотношение между высотами волн и величиной подъема упрочненного слоя: а – соотношение между h и h' ; б – соотношение между Δ и h'

Анализируя рис. 7 можно отметить, что при известном значении высоты волны h' можно определить числовое значение высоты h , а следовательно и подъем металла, который является первоначальной информацией для оцен-

ки точности диаметральных размеров упрочненных деталей.

Заключение

По результатам компьютерного моделиро-

вания и численных расчетов установлено:

1. При малой величине натяга ($t = 0,1 \dots 0,2$ мм) подъем металла после маятникового ППД, составляет 1,3...2,3 мкм, что соответствует полю допуска 1-го качества точности. Наибольший подъем упрочнённого слоя имеет место при радиальном натяге около 0,5 мм. С увеличением диаметра заготовки величина подъема упрочнённого слоя снижается.

2. Повышение подачи рабочего инструмента приводит к снижению величины подъема упрочнённого слоя. При подаче свыше 0,33 мм/об величина подъема приближается к нулю. Величина подъема металла в малой степени зависит от частоты вращения заготовки и частоты маятникового движения рабочего инструмента.

3. Максимальное значение высоты волны и величины подъема получено при обработке материалов с низким модулем упругости (магний-сплав МА12, алюминиевый сплав АМг6Н), а при обработке металла с более высоким модулем упругости (нержавеющая сталь 08Х18Н10 и конструкционная сталь 45) значение высоты волны и величины подъема значительно ниже.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Суслов А.Г., Дальский А.М.** Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
2. **Вирт А.Э.** Влияние силы деформирования при поверхностном пластическом деформировании на глубину упрочнения поверхностного слоя детали // Научно-емкие технологии в машиностроении. 2021. № 1(115). С. 44–28.
3. **Демин В.А.** Управление качеством заготовок, получаемых обработкой металлов давлением // Научно-емкие технологии в машиностроении. 2018. № 3 (8). С. 3–9.
4. **Зайдес С.А., Хо Минь Куан.** Способ поверхностно-пластического деформирования наружной поверхности детали в виде тела вращения / Пат. 2757643 RU. заявл. 04.02.2021; опубл. 19.10.2021.
5. **Зайдес С.А., Фам Ван Ань.** Способ поверхностного пластического деформирования / Пат. 2707844 RU.; заявл. 26.02.2019; опубл. 29.11.2019.

6. **Zaides S.A., Ho Minh Quan, Mai Duc Nghia.** Effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface / Polytech Journal. 2021. Т. 25. № 6 (161).

7. **Лебедев В.А.** Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки / под ред. А.В. Киричек. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 403 с.

8. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. Москва: Машиностроение, 2000. 320 с.

9. **Saiif Bin Rayhan, Md Mazedur Rahman.** Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer // Procedia Structural Integrity. 2020. Vol. 28. P. 1892–1900.

10. **Басов К.А.** Ansys: справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.

REFERENCES

1. **Suslov A.G. Dalsky A.M.** Scientific foundations of engineering technology. M.: Mashinostroenie, 2002, 684 p.
2. **Wirth A.E.** Influence of the deformation force during surface plastic deformation on the depth of hardening of the surface layer of the part // high technologies in mechanical engineering, No. 1(115), 2021, P 44-28.
3. **Demin V.A.** Quality management of workpieces obtained by pressure treatment of metals // Science-intensive technologies in mechanical engineering, No. 3 (81), 2018, C 3-9.
4. **Zaides S.A., Ho Ming Quan.** The method of surface-plastic deformation of the outer surface of the part in the form of a body of revolution / Pat. 2757643 EN. application 04.02.2021; publ. 10/19/2021.
5. **Zaides S.A., Pham Van Anh.** The method of surface plastic deformation /. Pat. 2707844 EN.; application 26.02.2019; publ. 11/29/2019.
6. **Zaides S.A., Ho Minh Quan, Mai Duc nghia.** Effect of the sector radius of a workpiece-deforming tool on the stress-strain state in the contact zone with a cylindrical surface. /iPolytech Journal T25 №6 (161) 2021.
7. **Lebedev V.A.** Efficient technologies of surface plastic deformation and combined processing / ed. A.V. Kirichkek. M.: Spektr Publishing House, 2014. 403 p.
8. **Suslov A.G.** The quality of the surface layer of machine parts. Moscow: Mashinostroenie, 2000. 320 p.
9. **Saiif Bin Rayhan, Md Mazedur Rahman.** Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer // Procedia Structural Integrity, Volume 28,2020, P. 1892-1900.
10. **Basov K.A.** Ansys: user guide. M.: DMK Press, 2005. 640 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.12.2022; одобрена после рецензирования 15.12.2022; принята к публикации 28.12.2022.

The article was submitted 08.12.2022; approved after reviewing 15.12.2022; assepted for publication 28.12.2022.