



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Стационарность профиля инструмента при моделировании поверхностного пластического деформирования обкатыванием как процесса плоской дробной деформации

Андрей Кречетов^{а, *}

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, ул. Весенняя, 28, г. Кемерово, 650000, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-7569-7362>, krechetovaa@kuzstu.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.787

История статьи:

Поступила: 03 марта 2021
 Рецензирование: 16 марта 2021
 Принята к печати: 03 апреля 2021
 Доступно онлайн: 15 июня 2021

Ключевые слова:

Поверхностное пластическое деформирование обкатыванием
 Механика технологического наследования
 Моделирование накопления деформаций и поврежденности металла

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00587.

АННОТАЦИЯ

Введение. Поверхностное пластическое деформирование, в том числе обкатывание, является эффективным способом повышения эксплуатационных свойств деталей машин. Одним из перспективных подходов к проектированию упрочняющих технологических процессов является механика технологического наследования. Для расчета наследственных параметров, характеризующих накопленную деформацию и поврежденность металла, возможно моделирование обкатывания как процесса плоской дробной деформации, что позволяет существенно сократить сроки моделирования процесса. Однако при вращении плоскости, в которой рассматривается напряженно-деформированное состояние, происходит изменение профиля ролика. **Целью работы** является оценка величины изменения профиля ролика в плоскости деформации в процессе деформирования как важного фактора, обеспечивающего точность получаемого решения. **Методы исследования.** Профиль ролика в плоскости деформации определяется линией пересечения поверхности ролика и этой плоскости. В работе приведен порядок расчета координат точек линий пересечения, представляющих собой кривые четвертого порядка, в зависимости от геометрических размеров ролика и детали, а также угла наклона плоскости деформации. **Результаты и обсуждение.** Для оценки величины изменения профиля ролика были определены координаты точек линий пересечения поверхности ролика и плоскости деформации для режимов обкатывания, соответствующих достаточно развитой пластической деформации, проведена аппроксимация полученных линий в системе координат, связанной с плоскостью деформации, и оценено относительное изменение координат линий пересечения при повороте плоскости деформации. В результате проведенных аналитических исследований установлено, что даже при развитой пластической деформации относительное изменение координат точек линий пересечения не превышает 0,1 %. Это свидетельствует о возможности использования при моделировании обкатывания с использованием модели плоской дробной деформации стационарного профиля ролика.

Для цитирования: Кречетов А.А. Стационарность профиля инструмента при моделировании поверхностного пластического деформирования обкатыванием как процесса плоской дробной деформации // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 54–65. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.2-54-65.

Введение

Одним из эффективных методов повышения эксплуатационных свойств деталей машин, особенно с точки зрения повышения характеристик усталостной прочности, является поверхностное пластическое деформирование. Упрочнение

поверхностного слоя, уменьшение шероховатости, формирование благоприятных сжимающих остаточных напряжений позволяют значительно повысить предел выносливости и циклическую долговечность деталей [1–7]. Поверхностным пластическим деформированием обрабатывают как поверхности, имеющие относительно простые формы (например, наружные и внутренние цилиндрические поверхности), так и сложные криволинейные поверхности (например, поверхности лопаток реактивных двигателей) [8].

Степень и глубина упрочнения поверхностного слоя, качество поверхности, распределение

*Адрес для переписки

Кречетов Андрей Александрович, к.т.н., доцент
 Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
 ул. Весенняя, 28,
 650000, г. Кемерово, Россия
 Тел.: 8 (3842) 39-63-75, e-mail: krechetovaa@kuzstu.ru

остаточных напряжений после поверхностного пластического деформирования зависят от технологических режимов обработки и физико-механических свойств обрабатываемого материала [9–10]. Неправильно назначенные режимы обработки приводят к тому, что увеличение характеристик сопротивления усталости и улучшение качества поверхности являются незначительными и в ряде случаев могут приводить к ухудшению качества поверхности [11–13].

Задача определения свойств поверхностного слоя при поверхностном пластическом деформировании осложняется тем, что итоговые значения свойств определяются не только режимами окончательной обработки, но и историей нагружения металла поверхностного слоя на предшествующих операциях обработки [14, 15]. Это явление получило название технологического наследования.

В настоящее время имеется большое количество работ, позволяющих прогнозировать результат обработки путем моделирования процесса поверхностного пластического деформирования, при этом в качестве исходных данных для моделирования могут использоваться непосредственно режимы обработки или определяемые параметры процесса (например, контактное давление) [16–19].

Одним из перспективных подходов к проектированию упрочняющих технологических процессов обкатыванием с учетом истории нагружения является механика технологического наследования [20]. В соответствии с основными положениями механики технологического наследования главными параметрами состояния поверхностного слоя являются степень деформации сдвига Λ , характеризующая упрочнение поверхностного слоя, степень исчерпания запаса пластичности Ψ , характеризующая накопленную поврежденность металла поверхностного слоя, и тензор остаточных напряжений.

Расчет значений напряжений и деформаций, необходимых для расчета значений накопленной степени деформации сдвига и степени исчерпания запаса пластичности, возможен путем конечно-элементного моделирования объемного напряженно-деформированного состояния при контактном взаимодействии ролика и детали. Однако нелинейный характер этой задачи, необходимость использования элементов малого

размера, что обуславливает их большое количество, приводят к существенному увеличению трудоемкости создания модели и времени расчета. Поэтому важным является возможность конечно-элементного моделирования контактного взаимодействия ролика и обрабатываемой детали в плоской постановке.

В работе [21] показано, что деформации в тангенциальном сечении обрабатываемой детали (в плоскости, перпендикулярной оси образца) малы по сравнению с деформациями в осевом сечении (в плоскости, на которой лежит ось детали). Это обуславливает возможность проведения расчета напряженно-деформированного состояния при обкатывании в плоскодеформированной постановке, рассматривая его как процесс плоской дробной деформации. При этом смещение материальных частиц, возникновение и изменение напряжений и деформаций рассматривается в плоскости деформации (осевом сечении детали) при ее вращении относительно оси детали в процессе обработки.

Профиль ролика в каждый момент определяется как линия пересечения поверхности ролика и плоскости деформации. Очевидно, что при изменении угла поворота плоскости деформации профиль ролика будет изменяться.

В связи с этим важным вопросом, определяющим возможность моделирования процесса обкатывания в плоской постановке с использованием модели ролика постоянного профиля, является оценка величины изменения профиля ролика при повороте плоскости деформации.

Цель работы: оценка величины изменения профиля ролика в плоскости деформации в процессе обкатывания при ее повороте.

Задачи работы: аналитическое описание профиля инструмента в плоскости деформации в зависимости от угла поворота плоскости деформации; определение координат точек линий профиля инструмента при повороте плоскости деформации; определение относительного изменения координат точек профиля ролика при повороте плоскости деформации.

Методика исследований

В процессе обкатывания в зоне контакта инструмента с деталью возникает очаг деформации – локальная область пластической деформации

ции. Характерным признаком очага деформации в осевом сечении детали является наличие пластической волны перед роликом. На каждом обороте детали ролик смещается относительно очага деформации, образованного на предыдущем обороте, на величину подачи.

Вместе с тем при предположении о неподвижности ролика каждая материальная точка детали движется по спирали, перемещаясь в осевом направлении относительно ролика на величину подачи за каждый оборот детали. При прохождении материальной частицы в очаге деформации вдоль линии тока происходит накопление деформации и поврежденности металла.

Размеры очага деформации зависят от режимов: силы обкатывания P , профильного радиуса ролика R_{pr} , диаметра ролика D_r , подачи s , диаметра детали D_p и в окружном направлении характеризуются углом деформации φ_d (рис. 1).

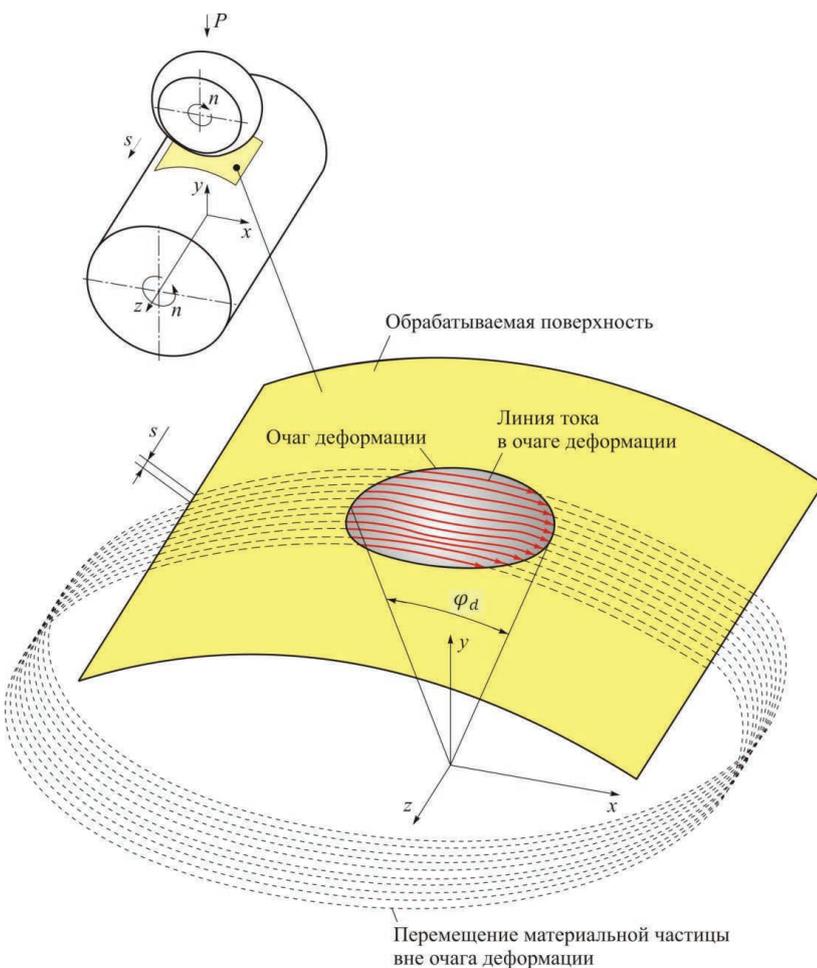


Рис. 1. Линия тока при движении материальной частицы в очаге деформации

Fig. 1. The flow line while the material particle movement in the deformation area

Перемещение материальной частицы в очаге деформации складывается вследствие поворота детали относительно инструмента (эта величина одинакова для всех материальных частиц на одинаковой глубине) v_{rot} и перемещения относительно других материальных частиц вследствие контактного взаимодействия поверхности детали с инструментом v_d (рис. 2).

Возникновение и изменение напряжений и деформаций обусловлено последовательными перемещениями материальных частиц v_d при повороте детали относительно ролика.

При взаимодействии ролика и обрабатываемой детали рассматриваемое сечение последовательно поворачивается относительно оси детали (рис. 3), что вызывает в плоскости сечения перемещение профиля ролика v_t и материальных частиц обрабатываемого тела v_d (рис. 4). Перемещение профиля ролика состоит из вертикального перемещения v_{ty} , обусловленного последовательным поворотом сечения по направлению к центральному сечению ролика, и горизонтального перемещения v_{tx} , которое возникает вследствие подачи инструмента s . Величину v_{tx} можно оценить как

$$v_{tx} = \frac{\varphi_d}{4\pi} s. \tag{1}$$

Профиль ролика при повороте в плоскости деформации изменяется, в каждом сечении он определяется как линия пересечения поверхности ролика и плоскости деформации. В момент времени, соответствующий положению плоскости деформации 3 (рис. 3), профиль инструмента представляет собой дугу окружности. В моменты, соответствующие положениям плоскости деформации 1 и 2, линия пересечения представляет собой кривую четвертого порядка, координаты точек которой определяются решением системы уравнений. Одно из них описывает уравнение поверхности ролика, второе – плоскость деформации.

Поверхность рассматриваемого ролика представляет собой тор, в случае выбора системы координат, при которой ось z совпадает с осью вращения

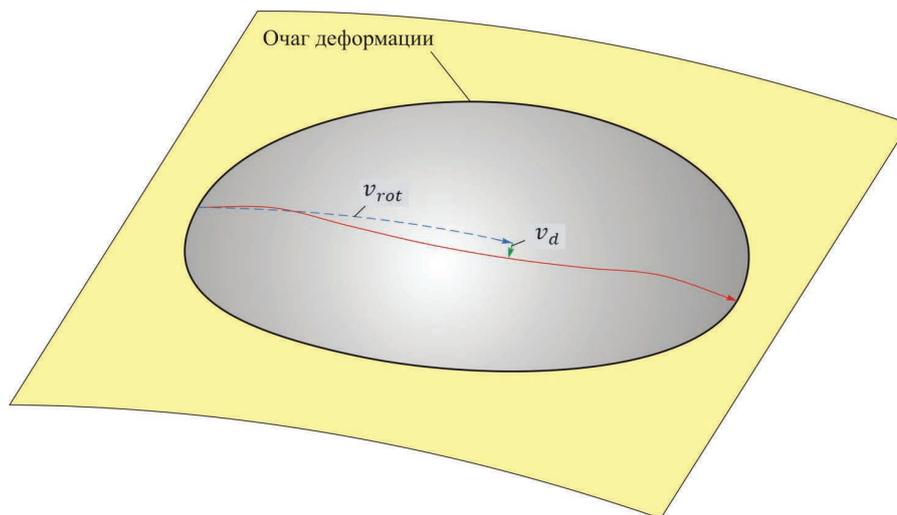


Рис. 2. Перемещение материальной частицы при движении вдоль линии тока в очаге деформации

Fig. 2. Material particle displacement while moving along the flow line in the deformation area

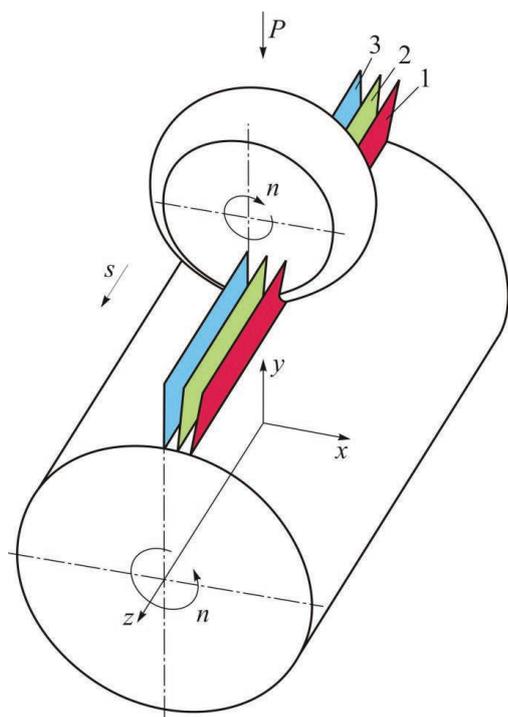


Рис. 3. Положения плоскости деформации при повороте детали

Fig. 3. Deformation plane positions when the piece is rotated

ния образующей окружности (рис. 5), уравнение поверхности будет иметь вид

$$\left(x^2 + y^2 + z^2 + R_r^2 - R_{pr}^2\right)^2 - 4R_r^2(x^2 + y^2) = 0, \quad (2)$$

где R_r – радиус вращения образующей поверхности; R_{pr} – профильный радиус ролика (радиус образующей поверхности).

Ось детали параллельна оси z и лежит в плоскости yo_z , плоскость деформации проходит через ось детали и расположена под некоторым углом α относительно плоскости yo_z .

Тогда уравнение плоскости деформации относительно x будет иметь вид

$$x = \operatorname{tg}\alpha(\Sigma R - y), \quad (3)$$

где ΣR – расстояние от оси вращения образующей окружности ролика до оси детали, определяемое суммой всех радиусов:

$$\Sigma R = R_r + R_{pr} + R_p, \quad (4)$$

где R_p – радиус детали.

После подстановки уравнения плоскости деформации (3) в уравнение поверхности ролика (2) и введения обозначений получим

$$(z^2 + B)^2 - C = 0, \quad (5)$$

где

$$B = A + R_r^2 - R_{pr}^2, \quad (6)$$

$$C = 4AR_r^2, \quad (7)$$

$$A = y^2(1 + \operatorname{tg}^2\alpha) + \Sigma R(\Sigma R - 2y)\operatorname{tg}^2\alpha. \quad (8)$$

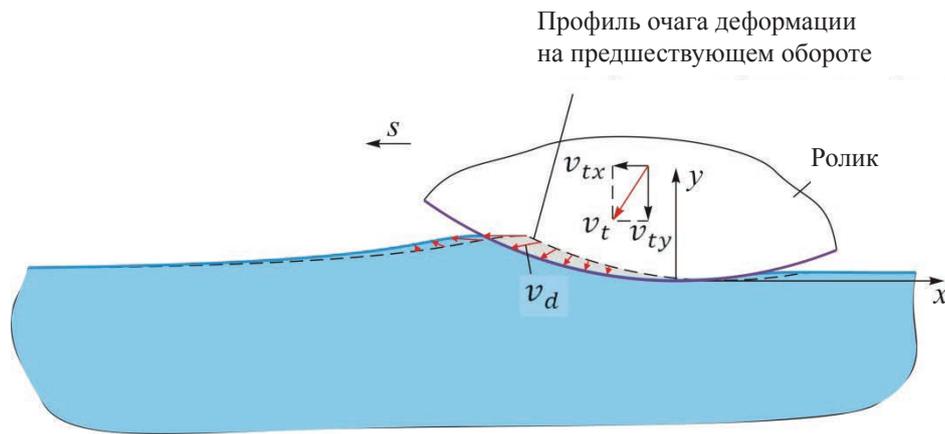


Рис. 4. Перемещения в плоскости деформации при ее повороте

Fig. 4. Displacements in the deformation plane while it is rotated

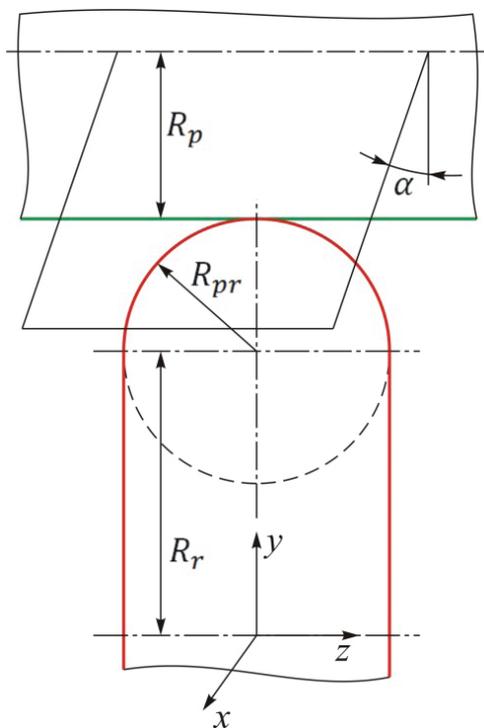


Рис. 5. Система координат для определения линии пересечения поверхности ролика и плоскости деформации

Fig. 5. Coordinate system for determining the intersection line of the roller surface and the deformation plane

Полагая $\zeta = z^2$, из (5) получим квадратное уравнение

$$\zeta^2 + 2B\zeta + (B^2 - C) = 0. \quad (9)$$

Решив это уравнение, можно определить z как $\sqrt{\zeta}$.

Таким образом, координаты x и z каждой точки линии пересечения поверхности ролика и плоскости деформации, повернутой на угол α , можно определить по заданному значению координаты y с использованием выражений (3) и (9).

Для расчета координат точек линии пересечения в системе координат, связанной с плоскостью деформации, можно воспользоваться следующими выражениями:

$$x_{cp} = 0; \quad (10)$$

$$y_{cp} = y \cos \alpha; \quad (11)$$

$$z_{cp} = z. \quad (12)$$

Результаты и их обсуждение

Для оценки изменения профиля при повороте плоскости деформации были рассчитаны координаты точек линий пересечения поверхности ролика и плоскости деформации при $R_{pr} = 7$ мм, $R_r = 8$ мм, $R_p = 20$ мм, $\Sigma R = 35$ мм для угла наклона плоскости деформации α 0° , 2° , 4° и 6° (рис. 6, табл. 1).

Значение угла деформации φ_d в этом случае составляет 12° , что заведомо больше реальных значений φ_d при обработке. Далее координаты точек линий пересечения переводились в систему координат плоскости деформации по формулам (10)–(12) и приводились к общей координате y_{cp} для верхней точки линии

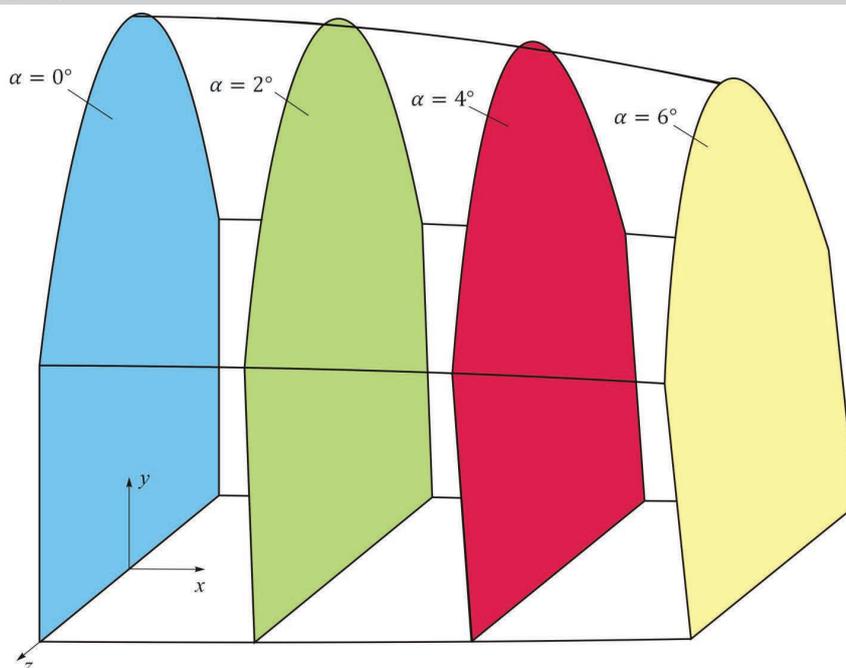


Рис. 6. Линии пересечения поверхности ролика и плоскости деформации при ее повороте

Fig. 6. The intersection lines of the roller surface and the deformation plane while this plane is rotated

Таблица 1

Table 1

Координаты точек линий пересечения в глобальной системе координат, мм
Coordinates of the intersection lines points in the global coordinate system, mm

$\alpha = 0^\circ$			$\alpha = 2^\circ$			$\alpha = 4^\circ$			$\alpha = 6^\circ$		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
0,00	14,00	3,61	0,73	13,99	3,57	1,47	13,97	3,47	2,22	13,92	3,30
0,00	14,10	3,43	0,73	14,09	3,40	1,46	14,07	3,30	2,20	14,02	3,11
0,00	14,20	3,25	0,73	14,19	3,21	1,46	14,17	3,10	2,19	14,12	2,91
0,00	14,30	3,05	0,72	14,29	3,01	1,45	14,27	2,90	2,18	14,22	2,69
0,00	14,40	2,84	0,72	14,39	2,79	1,44	14,36	2,67	2,17	14,32	2,44
0,00	14,50	2,60	0,72	14,49	2,55	1,44	14,46	2,41	2,16	14,42	2,16
0,00	14,60	2,33	0,71	14,59	2,28	1,43	14,56	2,13	2,15	14,52	1,83
0,00	14,70	2,03	0,71	14,69	1,97	1,42	14,66	1,79	2,14	14,62	1,42
0,00	14,80	1,66	0,71	14,79	1,59	1,42	14,76	1,36	2,13	14,72	0,82
0,00	14,90	1,18	0,70	14,89	1,08	1,41	14,86	0,69	2,13	14,74	0,64
0,00	15,00	0,00	0,70	14,97	0,00	1,41	14,90	0,00	2,13	14,77	0,00

пересечения (табл. 2). Линии пересечения для углов наклона плоскости деформации 0° и 6° показаны на рис. 7.

Линии пересечения поверхности ролика и плоскости деформации представляют собой в общем случае кривые четвертого порядка, коэф-

фициенты аппроксимации этих линий полиномами четвертого порядка вида

$$y_{\text{ср}} = a_0 + a_1 z_{\text{ср}} + a_2 z_{\text{ср}}^2 + a_3 z_{\text{ср}}^3 + a_4 z_{\text{ср}}^4 \quad (13)$$

приведены в табл. 3.

Координаты точек линий пересечения в системе координат плоскости деформации, мм
Coordinates of the intersection lines points in the coordinate system of the deformation plane, mm

$\alpha=0^\circ$		$\alpha=2^\circ$		$\alpha=4^\circ$		$\alpha=6^\circ$	
z_{cp}	y_{cp}	z_{cp}	y_{cp}	z_{cp}	y_{cp}	z_{cp}	y_{cp}
3,606	14,000	3,573	14,017	3,475	14,068	3,301	14,155
3,434	14,100	3,400	14,117	3,296	14,168	3,112	14,254
3,250	14,200	3,214	14,217	3,104	14,268	2,908	14,354
3,051	14,300	3,013	14,317	2,896	14,367	2,685	14,453
2,835	14,400	2,795	14,417	2,667	14,467	2,438	14,553
2,598	14,500	2,553	14,517	2,414	14,567	2,158	14,652
2,332	14,600	2,283	14,617	2,125	14,667	1,830	14,752
2,027	14,700	1,970	14,716	1,786	14,766	1,422	14,851
1,661	14,800	1,591	14,816	1,357	14,866	0,823	14,951
1,179	14,900	1,078	14,916	0,688	14,966	0,636	14,970
0,000	15,000	0,000	15,000	0,000	15,000	0,000	15,000

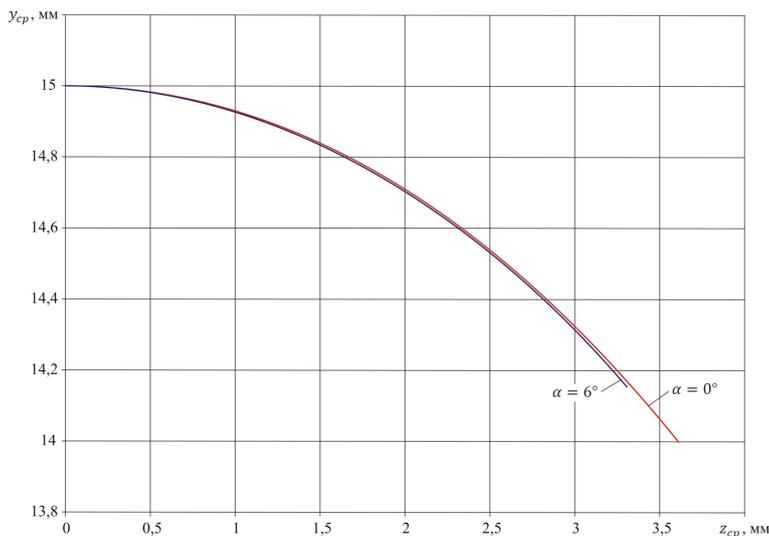


Рис. 7. Линии пересечения поверхности ролика и плоскости деформации

Fig. 7. The intersection lines of the roller surface and the deformation plane

В табл. 4 приведены расчетные значения y_{cp} по заданным значениям z_{cp} для углов поворота плоскости деформации 0° и 6° , отклонение профиля для 6° относительно профиля для 0°

$$\Delta_{cp} = \frac{y_{cp0^\circ} - y_{cp6^\circ}}{y_{cp0^\circ}}, \quad (14)$$

а также отклонение профиля для 0° от образующей детали,

$$h = 15 - y_{cp0^\circ} \quad (15)$$

Эта величина характеризует вертикальный размер пластической волны, в том случае если контакт инструмента и детали начнется при этом значении z_{cp} .

Зависимость отклонения профиля от h представлена на рис. 8. Анализ полученных результатов показывает, что даже для $h = 0,6$ мм, что соответствует интенсивному пластическому течению металла при обкатывании, изменение координат точек профиля ролика при повороте плоскости деформации не превышает 0,1%.

При увеличении диаметра детали, диаметра ролика, а также при уменьшении высоты волны изменение профиля ролика уменьшается. Это дает основание утверждать, что моделирование обкатывания как процесса плоской дробной деформации с использованием постоянного профиля ролика не приводит к возникновению сколько-нибудь значимой погрешности.

Таблица 3

Table 3

Коэффициенты аппроксимации линий пересечения поверхности ролика и плоскости деформации полиномами четвертого порядка
Coefficients of intersection lines approximation of the roller surface and the deformation plane by fourth-order polynomials

Коэффициент Coefficient	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 6^\circ$
α_0	15	15
α_1	0,0009	0,0005
α_2	-0,0731	-0,0741
α_3	0,0011	0,001
α_4	-0,0006	-0,0006

Таблица 4

Table 4

Изменение профиля инструмента при повороте плоскости деформации
Changing the tool profile when the deformation plane is rotated

z_p , мм	$y_{cp} 0^\circ$, мм	$y_{cp} 6^\circ$, мм	Δ_{cp} , %	h , мм
0,5	14,982	14,982	0,003	0,018
1,0	14,928	14,927	0,010	0,073
1,5	14,838	14,834	0,021	0,166
2,0	14,709	14,703	0,038	0,297
2,5	14,539	14,530	0,061	0,470
3,0	14,326	14,313	0,090	0,687

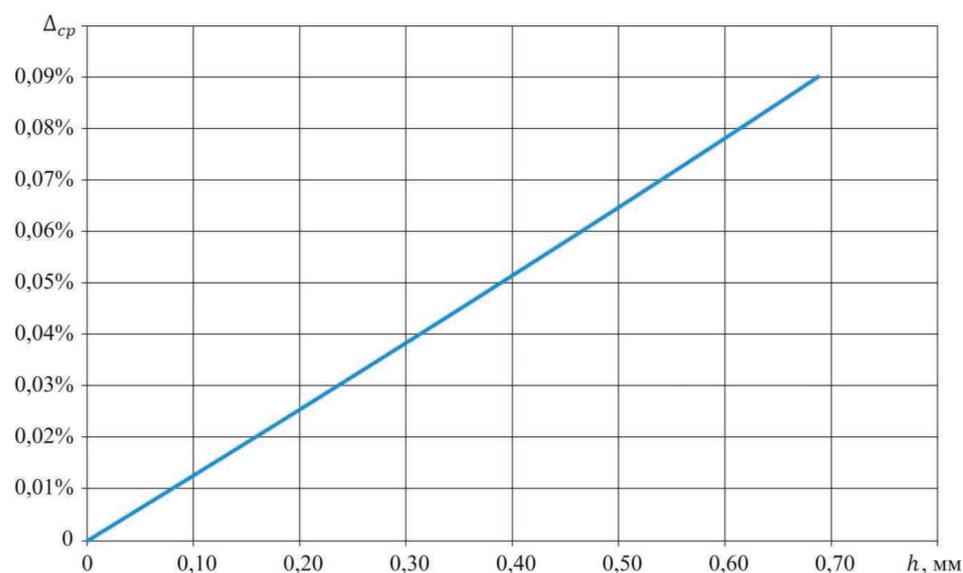


Рис. 8. Зависимость отклонения профиля от высоты пластической волны очага деформации

Fig. 8. Dependence of the profile deviation on the plastic wave height of the deformation area

Выводы

1. Получено аналитическое решение для определения координат точек линий пересечения поверхности ролика и плоскости деформации в зависимости от угла поворота плоскости деформации, в качестве исходных данных используются геометрические размеры детали и ролика, а также угол наклона плоскости деформации.

2. Получено относительное изменение координат точек линий профиля в плоскости деформации при ее повороте, показано, что даже при режимах обкатывания, сопровождающихся интенсивным пластическим течением, изменение координат не превышает 0,1 %.

3. Полученные результаты показывают возможность использования постоянного профиля ролика при моделировании обкатывания как процесса плоской дробной деформации.

Список литературы

1. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. В 2 т. Т. 1: справочник / А.Г. Суслов, В.Ю. Блюменштейн, Р.В. Гуров, А.Н. Исаев, Л.Г. Одинцов, В.В. Плешаков, В.П. Федоров, Ю.Г. Шнейдер; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.
2. State of the art of Deep Rolling / P. Delgado, I.I. Cuesta, J.M. Alegre, A. Díaz // Precision Engineering. – 2016. – Vol. 46. – P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.05.001.
3. Altenberger I. Deep Rolling – the past, the present and the future // 9th International Conference on Shot Peening ICSP-9. – Paris, France, 2005. – P. 144–155.
4. Технологическое обеспечение заданного качества поверхностного слоя деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования / М.А. Тамаркин, А.С. Шведова, Р.В. Гребенкин, С.А. Новокрещенов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 46–52. – DOI: 10.12737/20220.
5. Волков А.Н., Сазонов М.Б., Чигринев И.А. Исследование влияния методов ППД на структуру поверхностного слоя и сопротивление усталости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 3 (34). – С. 153–156.
6. Зайдес С.А., Бобровский И.Н., Фам Ван Ань. Влияние кинематики локального деформирования на напряженное состояние поверхностного слоя // Научные исследования в машиностроении. – 2019. – № 5 (95). – С. 32–38. – DOI: 10.30987/article_5ca3030a5bfe86.87759559.
7. Influence of process and geometry parameters on the surface layer state after roller burnishing of IN718 / F. Klocke, V. Bäcker, H. Wegner, B. Feldhaus, H.-U. Baron, R. Hessert // Production Engineering. – 2009. – Vol. 3 (4). – P. 391–399. – DOI: 10.1007/s11740-009-0182-0.
8. Wonga C.C., Hartawana A., Teoa W.K. Deep cold rolling of features on aero-engine components // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 13. – P. 350–354. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.059.
9. Fu H., Liu Y., Xu Q. Effect of deep rolling parameters on surface integrity of LZ50 axles // International Journal of Modern Physics B. – 2019. – Vol. 33, N 25. – P. 1950298. – DOI: 10.1142/S0217979219502989.
10. Wagner L., Ludian T., Wollmann M. Ball burnishing and roller burnishing to improve fatigue performance of structural alloys // Engineering Against Fracture / ed. by S. Pantelakis, C. Rodopoulos. – Dordrecht: Springer, 2009. – DOI: 10.1007/978-1-4020-9402-6_1.
11. Swirada S., Wdowika R. Determining the effect of ball burnishing parameters on surface roughness using the Taguchi method // Procedia Manufacturing. – 2019. – Vol. 34. – P. 287–292. – DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.152.
12. The influence of deep rolling on the surface integrity of AISI 1060 high carbon steel / A.M. Abrão, B. Denkenab, J. Köhlerb, B. Breidensteinb, T. Mörkeb // Procedia CIRP. – 2014. – Vol. 13. – P. 31–36. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.006.
13. Prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces / L. Hiegemann, C. Weddeling, N. BenKhalifa, A.E. Tekkaya // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 217. – P. 193–201. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.11.008.
14. Курицына В.В., Мартынюк А.В., Грачев М.В. Направленное поверхностно-пластическое деформирование в системе управления формой прецизионных деталей пневмогидроагрегатов // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – № 2 (20). – С. 55–63.
15. Kinner-Becker T., Sölter J., Karpuschewski B. A simulation-based analysis of internal material loads and material modifications in multi-step deep rolling // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 515–520. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.060.
16. Meyer D. Cryogenic deep rolling – An energy based approach for enhanced cold surface hardening // CIRP Annals. – 2012. – Vol. 61, iss. 1. – P. 543–546. – DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.102.

17. Finite element analysis of the roller burnishing process for fatigue resistance increase of engine components / F. Klocke, V. Bäcker, H. Wegner, M. Zimmermann // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2011. – Vol. 225, iss. 1. – P. 2–11. – DOI: 10.1243/09544054JEM2044.

18. Time-efficient prediction of the surface layer state after Deep Rolling using similarity mechanics approach / D. Trauth, F. Klocke, P. Mattfeld, A. Klinka // Procedia CIRP. – 2013. – Vol. 9. – P. 29–34. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.163.

19. Hettig M., Meyera D. Sequential multistage deep rolling under varied contact conditions // Procedia CIRP. – 2020. – Vol. 87. – P. 291–296. – DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.027.

20. Блюментейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.

21. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Автор. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Tool profile stationarity while simulating surface plastic deformation by rolling as a process of flat periodically reproducible deformation

Andrey Krechetov ^{a, *}

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesennyaya str., Kemerovo, 650000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-7569-7362>, krechetovaa@kuzstu.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 03 March 2021
Revised: 16 March 2021
Accepted: 03 April 2021
Available online: 15 June 2021

Keywords:

Deep rolling
Technological inheritance mechanics
Modeling of the accumulation of deformations and metal damage

Funding

The work was supported by RFBR, project number 20-08-00587.

ABSTRACT

Introduction. Surface plastic deformation is an effective way to improve the operating performance of machine parts. One of the promising approaches to the design of surface hardening technological processes is the technological inheritance mechanics. To calculate the hereditary parameters characterizing the accumulated deformation and damage to the metal, it is possible to simulate spinning as a process of plane fractional deformation, which significantly reduces the time required for modeling the process. However, upon rotation of the plane in which the stress-strain state is considered, the roller profile changes. **The aim of the work** is to assess the magnitude of the change in the roller profile in the deformation plane during deformation as an important factor ensuring the accuracy of the solution obtained. **Research methods.** The roll profile in the warp plane is defined by the intersection line of the roll surface and this plane. The paper presents the procedure for calculating the coordinates of the points of intersection lines, which are curves of the fourth order, depending on the geometric dimensions of the roller and the part, as well as the angle of inclination of the deformation plane. **Results and discussion.** To estimate the value of the roller profile change, the coordinates of the points of the intersection lines of the roller surface and the deformation plane are determined for the rolling modes corresponding to a sufficiently developed plastic deformation, the obtained lines are approximated in the coordinate system associated with the deformation plane, and the relative change in the coordinates of the intersection lines when the plane was rotated are estimated. As a result of the conducted analytical studies, it is found that even with developed plastic deformation, the relative change in the coordinates of the points of intersection lines does not exceed 0.1%. This indicates the possibility of using a stationary roller profile when simulating rolling using the plane fractional deformation model.

For citation: Krechetov A.A. Tool profile stationarity while simulating surface plastic deformation by rolling as a process of flat periodically reproducible deformation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 54–65. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-54-65. (In Russian).

References

1. Suslov A.G., ed. *Tekhnologiya i instrumenty otdelochno-uprochnyayushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem*. V 2 t. T. 1 [Technology and tools of finishing and strengthening processing of parts by surface plastic deformation. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2014. 480 p.
2. Delgado P., Cuesta I.I., Alegre J.M., Díaz A. State of the art of Deep Rolling. *Precision Engineering*, 2016, vol. 46, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.05.001.
3. Altenberger I. Deep Rolling – the past, the present and the future. *9th International Conference on Shot Peening ICSP-9*, Paris, France, 2005, pp. 144–155.
4. Tamarkin M.A., Shvedova A.S., Grebenkin R.V., Novokreshchenov S.A. Tekhnologicheskoe obespechenie zadannogo kachestva poverkhnostnogo sloya detalei pri obrabotke dinamicheskimi metodami poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Engineering support for specified quality of parts surface layer under dynamic

* Corresponding author

Krechetov Andrey A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
28 Vesennyaya str.,
650000, Kemerovo, Russian Federation
Tel.: 8 (3842) 39-63-75, e-mail: krechetovaa@kuzstu.ru



methods processing of surface plastic deformation]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Vestnik of Don State Technical University*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 46–52. DOI: 10.12737/20220. (In Russian).

5. Volkov A.N., Sazonov M.B., Schigrinyev I.A. Issledovanie vliyaniya metodov PPD na strukturu poverkhnostnogo sloya i soprotivlenie ustalosti [Research of influence of methods SPD on structure surface layer and resistance of fatigue]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta* = *Vestnik of the Samara State Aerospace University*, 2012, no. 3 (34), pp. 153–156.

6. Zaides S.A., Bobrovsky I.N., Fam Van. Vliyanie kinematiki lokal'nogo deformirovaniya na napryazhennoe sostoyanie poverkhnostnogo sloya [Impact of local deformation kinematics upon stressed state of surface layer]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* = *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2019, no. 5, pp. 32–38. DOI: 10.30987/article_5ca3030a5bfe86.87759559.

7. Klocke F., Bäcker V., Wegner H., Feldhaus B., Baron H.-U., Hessert R. Influence of process and geometry parameters on the surface layer state after roller burnishing of IN718. *Production Engineering*, 2009, vol. 3 (4), PP. 391–399. DOI: 10.1007/s11740-009-0182-0.

8. Wonga C.C., Hartawana A., Teoa W.K. Deep cold rolling of features on aero-engine components. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 13, pp. 350–354. DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.059.

9. Fu H., Liu Y., Xu Q. Effect of deep rolling parameters on surface integrity of LZ50 axles. *International Journal of Modern Physics B*, 2019, vol. 33, no. 25, p. 1950298. DOI: 10.1142/S0217979219502989.

10. Wagner L., Ludian T., Wollmann M. Ball-burnishing and roller-burnishing to improve fatigue performance of structural alloys. *Engineering Against Fracture*. Ed. by S. Pantelakis, C. Rodopoulos. Dordrecht, Springer, 2009. DOI: 10.1007/978-1-4020-9402-6_1.

11. Swirada S., Wdowika R. Determining the effect of ball burnishing parameters on surface roughness using the Taguchi method. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 34, pp. 287–292. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.152.

12. Abrão A.M., Denkena B., Köhler J., Breidenstein B., Mörkeb T. The influence of deep rolling on the surface integrity of AISI 1060 high carbon steel. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 13, pp. 31–36. DOI: 10.1016/j.procir.2014.04.006.

13. Hiegemann L., Weddeling C., BenKhalifa N., Tekkaya A.E. Prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 217, pp. 193–201. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.11.008.

14. Kuritsyna V.V., Martynyuk A.V., Grachev M.V. Napravlennoe poverkhnostno-plasticheskoe deformirovanie v sisteme upravleniya formoi pretsizionnykh detalei pnevmogidroagregatov [Directional surface plastic deformation in the shape control system of precision parts of pneumatic hydraulic units]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2014, no. 2 (20), pp. 55–63. (In Russian).

15. Kinner-Becker T., Sölter J., Karpuschewski B. A simulation-based analysis of internal material loads and material modifications in multi-step deep rolling. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 87, pp. 515–520. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.060.

16. Meyer D. Cryogenic deep rolling – An energy based approach for enhanced cold surface hardening. *CIRP Annals*, 2012, vol. 61, iss. 1, pp. 543–546. DOI: 10.1016/j.cirp.2012.03.102.

17. Klocke F., Bäcker V., Wegner H., Zimmermann M. Finite element analysis of the roller burnishing process for fatigue resistance increase of engine components. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, vol. 225, iss. 1, pp. 2–11. DOI: 10.1243/09544054JEM2044.

18. Trauth D., Klocke F., Mattfeld P., Klinka A. Time-efficient prediction of the surface layer state after Deep Rolling using similarity mechanics approach. *Procedia CIRP*, 2013, vol. 9, pp. 29–34. DOI: 10.1016/j.procir.2013.06.163.

19. Hettig M., Meyera D. Sequential multistage deep rolling under varied contact conditions. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 87, pp. 291–296. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.027.

20. Blyumenshtein V.Yu., Smelyanskii V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Technological inheritance mechanics at the stages of processing and operation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007. 400 p.

21. Smelyanskii V.M. *Mekhanika uprochneniya detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening mechanics of parts by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 300 p.

Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2021 The Author. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).