

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПРАВКИ НА ПЛОСКИХ КЛИНОВЫХ ПЛИТАХ

Зайдес С.А.¹, Буй М.¹, Чан С.Т.², Фунг М.К.²

¹*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск;*

²*Военно-воздушное училище, Нячанг, Вьетнам*

Ключевые слова: правка, упрочнение, нежесткая цилиндрическая деталь, плоская клиновая плита, искривление, момент сопротивления.

Аннотация. В статье теоретически определено условие вращения цилиндрической заготовки между плоскими клиновыми плитами и установлено допустимое значение исходного прогиба заготовки, которое не должно превышать 4 мм на длине 200 мм. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных технологий обработки нежестких цилиндрических деталей, способствующих повышению их эксплуатационных характеристик и точности изготовления.

DETERMINATION OF THE ROTATION CONDITIONS OF CURVED CYLINDRICAL WORKPIECES DURING STRAIGHTENING ON FLAT WEDGE PLATES

Zaides S.A.¹, Bui M.¹, Tran Xuan Thanh², Phung Manh Cuong²

¹*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk;*

²*Air Force Officer's College, Nha Trang, Vietnam*

Keywords: straightening, strengthening, flexible cylindrical part, flat wedge plate, distortion, section modulus.

Abstract. This article theoretically determines the condition for rotating a cylindrical workpiece between flat wedge plates and establishes the permissible value of the initial workpiece deflection, which should not exceed 4 mm over a length of 200 mm. The obtained results can be used in the development of effective machining technologies for flexible cylindrical parts, contributing to improved performance characteristics and manufacturing accuracy.

Современное машиностроение предъявляет повышенные требования к точности геометрических параметров и надёжности конструктивных элементов, особенно в отношении длинномерных цилиндрических деталей, таких как валы, оси, штоки и направляющие. Эти элементы широко применяются в транспортной, авиационной, энергетической, станкостроительной и других отраслях промышленности. Однако в процессе их изготовления часто возникают начальные геометрические отклонения от прямолинейности, обусловленные остаточными напряжениями после механической и термической обработки, нарушениями условий хранения, либо деформацией при транспортировке [1]. Искривление деталей существенно осложняет дальнейшую обработку, снижает точность сборки и может приводить к вибрациям, неравномерному износу, снижению ресурса и выходу узлов из строя при эксплуатации [2, 3].

В Иркутском национальном исследовательском техническом университете разрабатываются новые способы и устройства для правки и упрочнения

нежестких цилиндрических деталей типа валов и осей [4]. Данный способ предназначен в основном для обработки деталей из пластичных металлов и сплавов. Разработанные способы основаны на обкатке деталей плоскими плитами. Так как рабочий инструмент выполнен в виде плоских клиновых плит, то можно совместить процессы правки и упрочнения в одной технологической операции и выправлять цилиндрические детали, искривленные в разных плоскостях. Такой геометрической формой рабочего инструмента можно упрочнять даже весьма тонкие цилиндрические детали типа валов и осей.

Схема разработанного способа правки и упрочнения искривленных нежестких цилиндрических деталей представлена на рисунке 1.

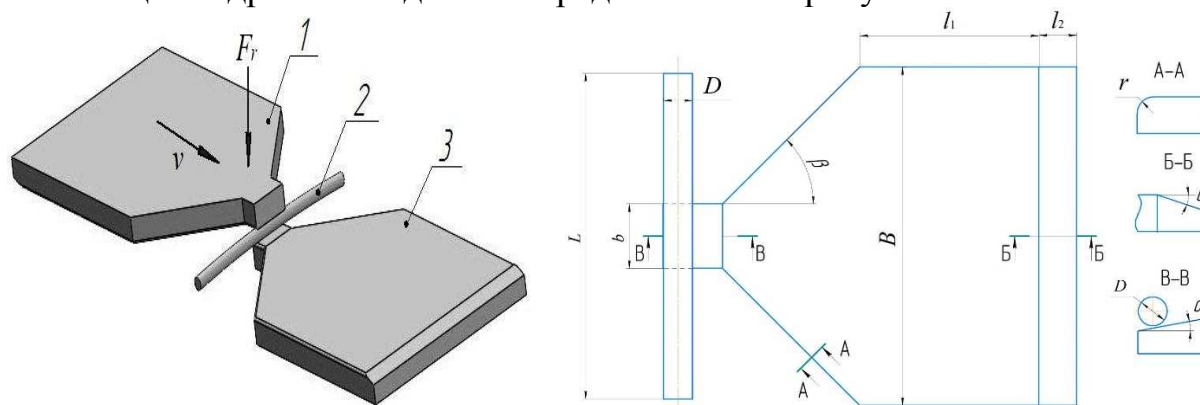


Рис. 1. Схема комбинированного процесса правки и упрочнения искривленных цилиндрических деталей плоскими клиновыми плитами:

1 – верхняя плита, 2 – заготовка, 3 – нижняя плита

Процесс правки и упрочнения искривленных цилиндрических деталей реализуется при помощи двух клиновых плит, направленных узкой частью навстречу друг-другу, одна из которых жестко закреплена, а другая перемещается в вертикальном и горизонтальном направлениях. Со стороны верхней плиты на заготовку действует радиальная сила F_r для выправления локального участка заготовки. Далее верхняя плита перемещается в горизонтальном направлении со скоростью v . За счет контакта с верхней плитой и сил трения цилиндрическая заготовка получает вращательный момент, начинает поворачиваться вокруг своей оси и одновременно испытывает изгиб, направленный против начального искривления.

Цель работы заключается в определении допустимых значений исходного прогиба заготовки на основе теоретического расчета условия вращения заготовки на клиновых плоских плитах.

Для анализа условий, при которых вращение цилиндрической заготовки действительно начинается (а не происходит проскальзывание), был выполнен оценочный расчёт момента сопротивления вращению. Вращение возникает за счёт касательной силы трения между верхней плитой и искривленной заготовкой при ее горизонтальном перемещении. Кривизна заготовки является сопротивлением вращению на плитах. Однако если моменты, создаваемые трением $M_{тр}$ и радиальной силой M_{Fr} , меньше сопротивления вращению $M_{сопр}$, заготовка начнет скользить, по поверхности плит не поворачиваясь. Так как радиальная сила F_r воздействует на заготовку в вертикальном направлении

поэтому при вращении заготовки вокруг своей оси ее можно пренебречь. Условие вращения заготовки можно выразить следующим условием:

$$M_{\text{тр}} \geq M_{\text{сопр.}}, \quad (1)$$

На рисунке 2 представлена схема силы трения, действующей на заготовку в процессе правки и упрочнения на клиновом участке.

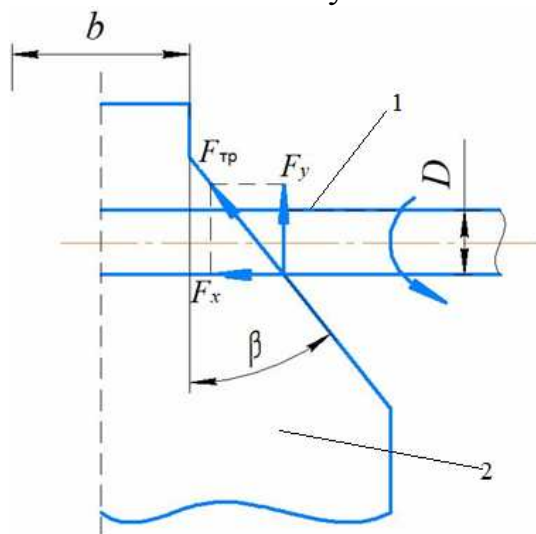


Рис. 2. Схемы трения между цилиндрической заготовкой (1) и плоской клиновой плитой (2) в процессе правки

Так как плоские плиты имеют клиновую форму, поэтому контакт между ними и цилиндрической заготовкой не прямолинейный. При этом касательная составляющая трения будет направлена не только вдоль оси заготовки F_x , но и по окружности её поверхности F_y , которая создает вращающий момент. Тогда формулы момента от силы трения будут следующие:

$$M_{\text{тр}} = F_y \cdot D = F_{\text{тр}} \cdot D \cdot \cos \beta = \mu \cdot F_r \cdot D \cdot \cos \beta, \quad (2)$$

где F_r – радиальная сила, Н; μ – коэффициент трения между заготовки и клиновыми плитами; D – диаметр заготовки, мм; β – угол развала клинового участка плит, град.

Момент сопротивления вращению возникает за счет искривления цилиндрической детали и определен по формуле [5]:

$$M_{\text{сопр.}} = E \cdot I \cdot k, \quad (3)$$

где E – модуль упругости материала, МПа; I – момент инерции поперечного сечения, мм⁴; k – начальная кривизна заготовки, мм⁻¹.

Значения начальной кривизны k и момент инерции поперечного сечения I для цилиндра можно принять [5]:

$$k \approx \frac{8 \cdot f_{\text{исх}}}{L^2}, I = \frac{\pi \cdot D^4}{64}, \quad (4)$$

где $f_{\text{исх}}$ – начальное максимальное отклонение оси заготовки (исходный прогиб детали), мм; L – длина заготовки, мм.

Поставим (4) в (3) получим:

$$M_{\text{сопр.}} = \frac{E \cdot \pi \cdot D^4 \cdot f_{\text{исх}}}{8L^2}. \quad (5)$$

Поставим (2) и (5) в условие (1) получим:

$$\mu \cdot F_r \cdot D \cdot \cos \beta \geq \frac{E \cdot \pi \cdot D^4 \cdot f_{\text{исх}}}{8L^2}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что условие вращения заготовки действительно зависит от величины ее начальной кривизны. При увеличении начальной кривизны заготовки контакт между инструментом и ее поверхностью становится менее равномерным, а сопротивление изгибу возрастает. Это приводит к тому, что момент, передаваемый через силы трения, возможно не будет вызывать вращение детали. Вместо этого наблюдается проскальзывание на плоских плитах, что снижает эффективность правки. Преобразуем (6) получаем максимальное допустимое значение исходного прогиба:

$$f_{\text{исх}} \leq \frac{8\mu \cdot F_r \cdot L^2 \cdot \cos \beta}{E \cdot \pi \cdot D^3}. \quad (7)$$

Согласно [6], предельное значение радиальной силы F_r для выправления центрального участка без повреждения поверхностного слоя заготовки:

$$F_r \leq \frac{8 \cdot I \cdot \sigma_T}{D^2} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \sigma_T}{8}, \quad (8)$$

где σ_T – предел текучести исследуемого материала, МПа.

Поставим (8) в условие (7) получим:

$$f_{\text{исх}} \leq \frac{\mu \cdot L^2 \cdot \sigma_T \cdot \cos \beta}{E \cdot D}. \quad (9)$$

На основе выражения (9) построим зависимости максимального исходного прогиба заготовки $f_{\text{исх}}$ от угла клинового участка плоских плит β и коэффициента трения μ между заготовкой и плитами для конструкционной стали Ст3 при постоянной длине и диаметре заготовки 10 мм (рис. 3).

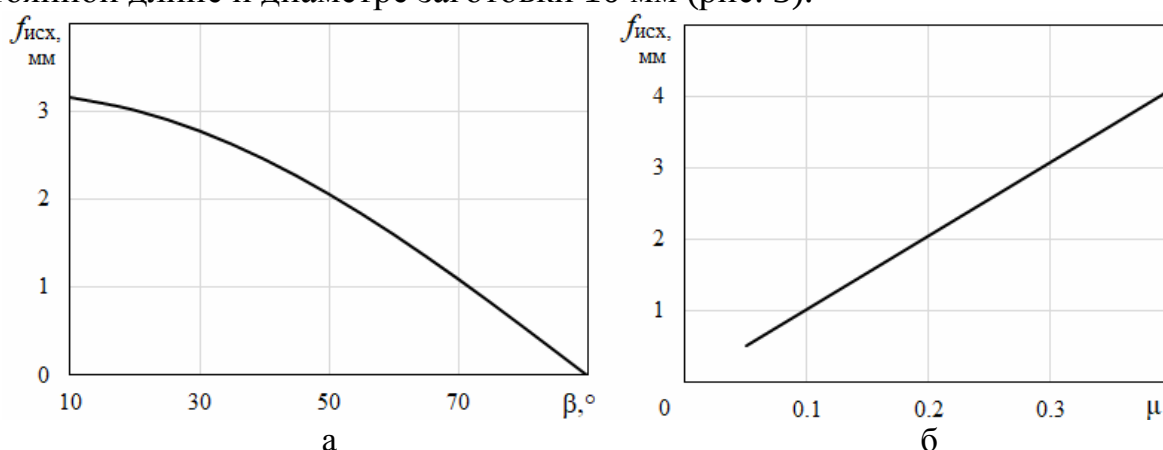


Рис 3. Зависимость максимального исходного прогиба заготовки $f_{\text{исх}}$ от угла клинового участка плит (а) и от коэффициента трения (б)

Из рисунка 3 видно, что значение $f_{\text{исх}}$ находится в обратной зависимости от угла β клинового участка плоских плит и в прямой зависимости от коэффициента трения. Из теоретического расчета установлено, что максимальное значение исходного прогиба заготовки должно составлять не более 4 мм на длине 200 мм. При превышении этого значения, вращение заготовки не будет происходить, а будет просто проскальзывание.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий упрочняющей правки в машиностроении и служить исходным условием для моделирования и экспериментальных исследования.

Список литературы

1. Суслов А.Г., Фёдоров В.П., Горленко О.А., Горленко А.О., Прокофьев А.Н., Тотай А.В., Федонин О.Н. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений. – М.: Машиностроение, 2006. – 447 с.
2. Мураткин Г.В., Сарафанова В.А. Правка валов поверхностным пластическим деформированием с упругим изгибом заготовки в процессе обработки // Вестник машиностроения. – 2020. – № 5. – С. 62-66. – doi.org/10.36652/0042-4633-2020-5-62-66.
3. Xing S. Analytical Modeling for Mechanical Straightening Process of Case-Hardened Circular Shaft. Appl. Mech. 2023, 4, pp.715-728. doi.org/10.3390/applmech4020036.
4. Патент №2827624 РФ. Способ правки и упрочнения цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, М.З. Буй. – Заявка №2024106758 от 15.03.2024; опубл. 30.09.2024.
5. Мураткин Г. В., Котова И.В. Критерии изгибной жесткости стержневых деталей // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006. – №2. – С. 42-45.
6. Зайдес С.А., Буй М.З. Определение напряженного состояния в очаге деформации при обкатке заготовки из углеродистой стали на локальном участке // Черные металлы. – 2025. – №4. – С. 41-47. – doi.org/10.17580/chm.2025.04.07.

Сведения об авторах:

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

Буй Мань Зунг – аспирант;

Чан Хуан Тхань – магистр, заместитель заведующего кафедрой базовой инженерии;

Фунг Мань Кыонг – к.т.н., преподаватель кафедры базовой инженерии.