

УДК 669.015

Чигиринский В. В.  
Кресанов Ю. С.  
Качан А. Я.  
Богуслаев А. В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Исследовалось течение металла при прокатке профилей ободьев колес грузовых автомобилей и заготовок компрессорных лопаток для авиадвигателей. Оба профиля являются тонкостенными в определенной своей части и прокатываются в условиях неравномерной деформации по ширине или по длине очага деформации.

В работах [1] и [2] представлен комплекс экспериментальных исследований по изучению течения металла при прокатке ободьев колес и заготовок лопаток для авиадвигателей с помощью «свидетелей».

Целью работы является экспериментальное исследование течения металла тонкостенных профилей специального назначения.

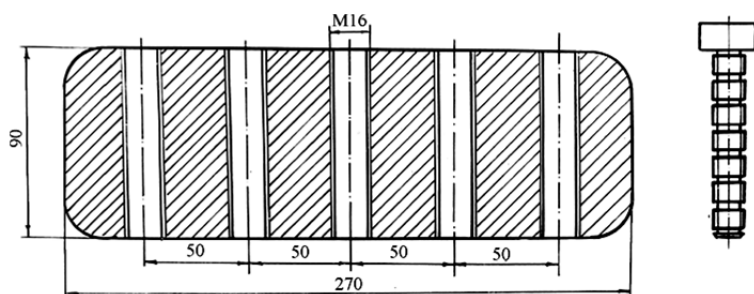


Рис. 1. Расположение «свидетелей» в заготовке

### *Профили ободьев колес.*

Использовались заготовки стали 15 КП с размерами поперечного сечения  $H \times B = 90 \times 270$  мм и длиной 1000–1700 мм. На горизонтальных гранях сверлились отверстия под резьбу через 50 мм. В подготовленные таким образом заготовки вворачивались винты с резьбой М16, рис. 1. Через каждые 10 мм на винтах делались про-

точки для облегчения замера деформированного «свидетеля». После нагрева и прокатки, были отобраны недокаты, из них вырезались и протрагивались темплеты.

### *Заготовки лопаток авиационных двигателей.*

Проводилось два типа экспериментальных исследований течения металла. Первый – исследовалось течение металла на поверхности раската с помощью координатной сетки, второй – на поверхности и в объеме с помощью свидетелей для заготовки лопатки. Изучалось течение металла на поверхности в продольных и поперечных сечениях очага деформации.

Круглые заготовки прокатывались в плоские заготовки, а затем плоские – в заготовки компрессорных лопаток. Использовался титановый сплав ВТ-8. На плоских образцах наносилась сетка с ячейками  $4 \times 4$  мм. Глубина нанесения рисок 0,2 мм.

Исследование проводилось на промышленном стане 330. Для этого использовались прямоугольные образцы сечением  $15,2 \times 27,5 \times 430$ . Образцы перед прокаткой нагревали в электропечи и бариевой ванне. Нагрев в электропечи 18...20 минут, в ванне 3...4 минуты. Для проведения испытаний в одинаковых условиях перед прокаткой валки протирали тонкой наждачной бумагой и промывали ацетоном. Налипание удалялось зачисткой абразивным камнем с зерном 30...40 мкм. Смазка валков осуществлялась водноколлоидным раствором и масляной смазкой с наполнителем. Образцы смазывались эмалями и стеклами с последующей сушкой на воздухе. Течение металла изучалось для заготовок разной формы. Для определения характера объемного течения металла в очаге деформации в плоских заготовках была нарезана резьба М5 с шагом 0,8 мм.

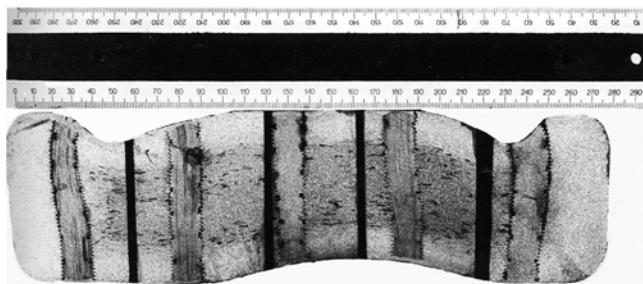


Рис. 2. Расположение «свидетелей» после 1-го прохода

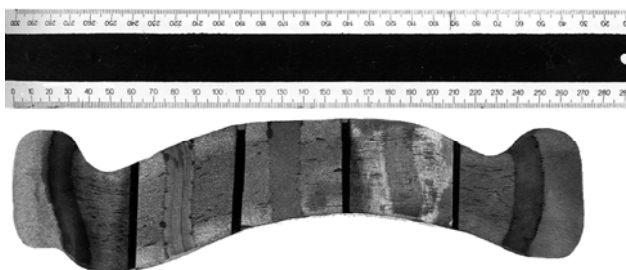


Рис. 3. Расположение «свидетелей» после 2-го прохода



Рис. 4. Расположение «свидетелей» после 3-го прохода

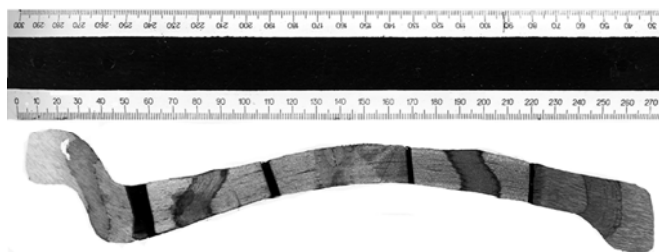


Рис. 5. Расположение «свидетелей» после 4-го прохода



Рис. 6. Расположение «свидетелей» после 5-го прохода

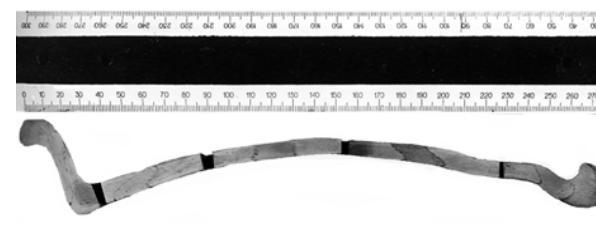


Рис. 7. Расположение «свидетелей» после 6-го прохода

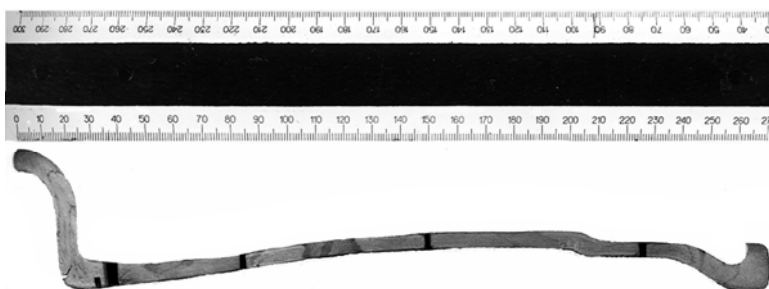


Рис. 8. Расположение «свидетелей» после 7-го прохода

Винты и материал заготовки изготавливались из одного сплава ВТ-8 и вворачивались в вертикальном и горизонтальном направлениях. Нагрев производили до температуры 920 °С и прокатывали с убыванием обжатия по перу лопатки в валках с диаметром начальной окружности 340 мм. Смазку и нагрев образцов хлористым барием производили путем погружения их в ванну с расплавленной солью при температуре 1120 °С.

На рис. 2–8 представлены совмещенные поперечные сечения заготовок во всех проходах со «свидетелями». Определены поперечные смещения центров винтов от прохода к проходу в зависимости от режима обжатия.

*Заготовки лопаток авиационных двигателей.*

Представлена схема очага деформации при периодической прокатке заготовок лопаток, рис. 9. На рис. 10 показаны экспериментальные данные поверхностных деформаций при прокатке заготовок в продольном направлении. На рис. 11–14 изображены темплеты со «свидетелями» в объеме деформированного металла после прокатки. Течение металла в замковой части профиля – рис. 11, встречное течение в замочной части – рис. 12. Сдвиговые деформации в зоне перехода между замочной и перьевой частью профиля – рис. 13, распределение деформации по ширине заготовки на – рис. 14. Трещины в перьевой части профиля изображены на рис. 15.

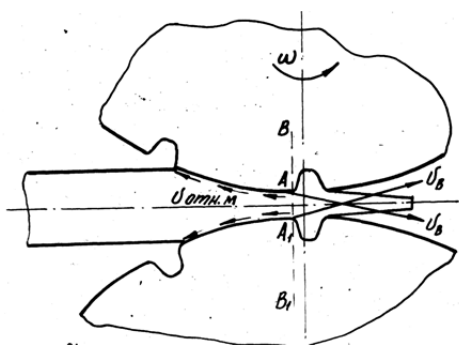


Рис. 9. Схема очага деформации при периодической прокатке заготовки лопатки

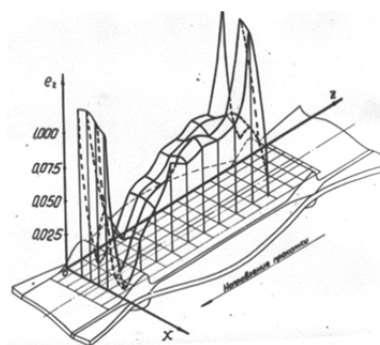


Рис. 10. Поле поверхностных деформаций при прокатке заготовок компрессорных лопаток в продольном направлении

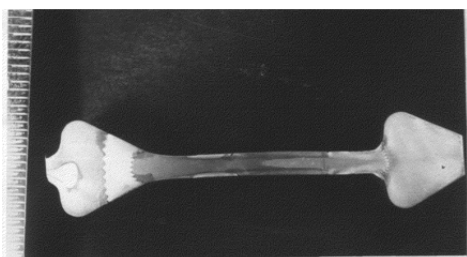


Рис. 11. Распределение деформаций при прокатке компрессорных лопаток (вертикальное положение винта в продольном сечении)

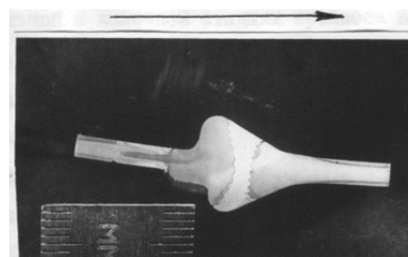


Рис. 12. Распределение деформаций при прокатке компрессорных лопаток (вертикальное положение винта в продольном сечении)



Рис. 13. Участок перехода от замковой части к перьевой



Рис. 14. Распределение деформаций при прокатке компрессорных лопаток (горизонтальное положение винта в поперечном сечении)

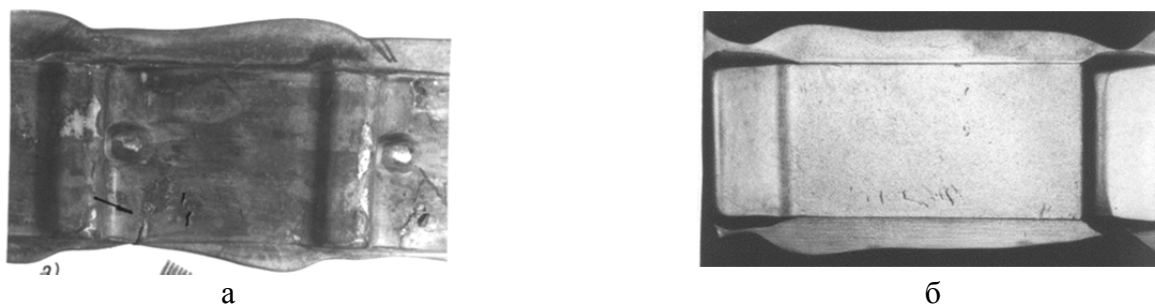


Рис. 15. Трещины на поверхности тонкостенной части профиля

#### *Профили ободьев колес.*

Из рис. 2 видно, что в первом разрезном калибре имеет место поперечное перемещение металла со стороны верхнего вала, где обозначен разъем калибров. Кроме обжатия определенной геометрией калибра обозначились локальные деформации со стороны выступов валков. Течение металла в поперечном направлении зафиксировано изгибом винтов в боковых зонах калибра и в центральной – со стороны нижнего гребня вала. Центры «свидетелей» на контактных поверхностях в поперечном направлении перемещаются таким образом, что металл из областей с большим обжатием или давлением перемещается в области с меньшим обжатием.

Второй и третий по ходу прокатки проходы характеризуется значительной неравномерностью деформации по ширине. Максимум обжатий обозначен соответственно в области будущей канавки крючка и в области конического участка профиля, рис. 3 и 4. Обозначились сдвиговые деформации в области наклонных центральных участков. Центры «свидетелей» перемещаются во втором проходе от канавки крючка в сторону будущей бортовой части, в третьем проходе от конического участка к перегибу в центре профиля. Взаимно противоположные поперечные перемещения определяют линии раздела течения металла.

Четвертый проход характеризуется высокой степенью деформации в центральной части профиля, называемой полотном. Металл в поперечном направлении растекается от места перегиба полотна в противоположных направлениях, рис. 5. На перемещения оказывают влияние локальные деформации в отдельных элементах профиля, происходит перетекание металла из областей большего обжатия в области с меньшей деформацией.

Пятый, шестой и седьмой относятся к чистовым проходам, в которых формируется окончательно профиль, рис. 6, 7 и 8. В пятом проходе формируется канавка крючка, что характеризуется «резом» полосы выступом верхнего вала в правой части калибра. Для устранения изгиба полосы в левой части профиля запроектирована интенсивная деформация в зоне конического участка. Поперечное течение металла обозначилось относительно перегиба полотна в центральной части профиля. В левой хвостовой части профиля происходит интенсивное перемещение в стойку хвостовика, т. е. из области большего обжатия в область меньшего. При этом хвостовик не имеет уширения, он утягивается за счет перемещения металла в противоположном направлении, из более обжимаемой зоны в менее. В шестом, седьмом проходах характер деформации и течения металла напоминает пятый. Это касается полотна и хвостовой части профиля, рис. 7 и 8.

#### *Заготовки лопаток авиационных двигателей*

Периодическая прокатка характеризуется областями увеличения и уменьшения обжатия. В первой зоне очага деформации опережение имеет значительную величину, во второй – опережение небольшое или отсутствует вообще, рис. 16, 17 [3].

При прокатке тонкостенных профилей это является определяющим фактором, т. к. возникает вопрос в какую область поместить тонкостенную часть профиля, в зону нарастания или убывания обжатия. Это связано с направлением движения полосы. Прокатка тонкостенной части профиля в области убывания обжатия характеризуется появлением растягивающих напряжений в пьезовой зоне, рис. 15.

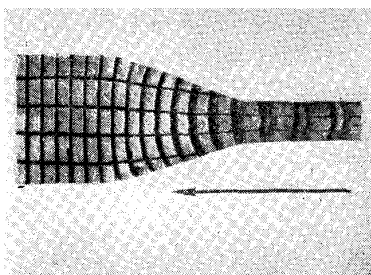


Рис. 16. Характер искривления рисок при прокатке с нарастанием обжатия

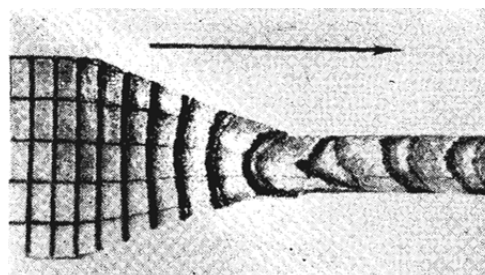


Рис. 17. Характер искривления рисок при прокатке с убыванием обжатия

В зоне убывания обжатия, рис. 9, преимущественно попятное течение металла (зона отставания), что подтверждается искривлением «свидетеля» в сторону замковой части, рис. 11. В зоне увеличения обжатия обозначилось течение металла в направлении прокатки (зона опережения). В замковой части профиля имеет место встречное течение, двояковогнутый «свидетель», со стороны контура отставания справа и со стороны контура опережения слева, рис. 12.

Поверхностная продольная деформация отличается большой неравномерностью, рис. 10. В зоне убывания обжатия поверхностная деформация увеличивается и достигает максимального значения в прилегающей зоне замочной части. С противоположного конца заготовки поверхностная деформация фактически отсутствует, в области пережима, или максимального высотного обжатия. Здесь формируется зона раздела течения металла, разделяя контуры отставания и опережения. Очевидно, в зонах изменения направления течения металла, перемещения или деформации должны быть минимальны или отсутствовать вообще. Если высотные деформации в этой области максимальны и это зона раздела течения металла, то должны быть максимальны и силы прокатки в данных сечениях. На рис. 18 показаны силы по длине профиля при периодической прокатке.

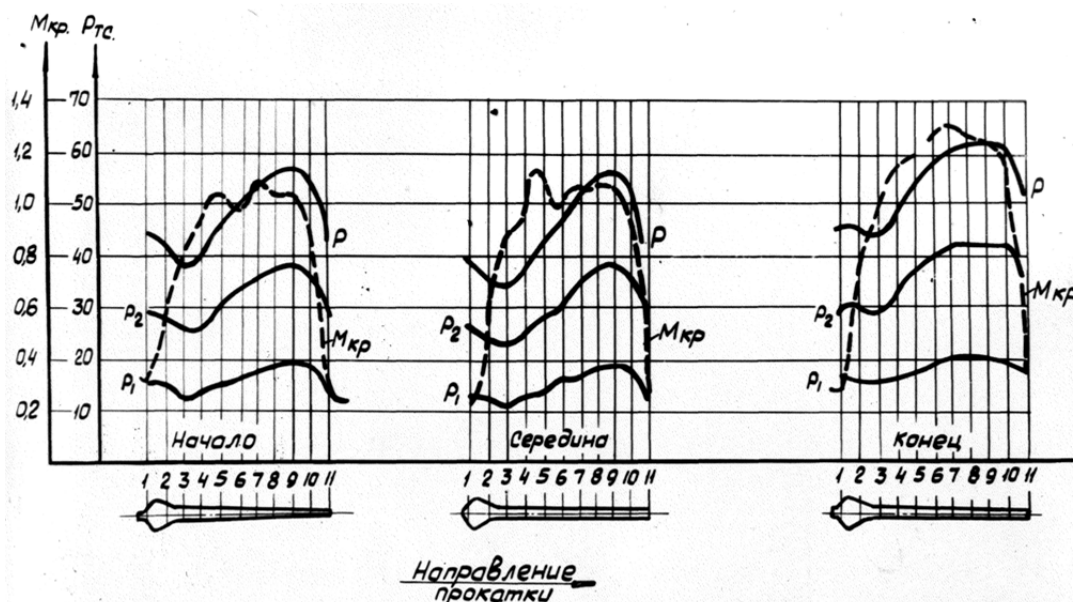


Рис. 18. График распределения давления и момента деформации при прокатке заготовок лопаток 1 ст. изд. АИ-25 из сплава ВТ-8

Сопоставляя деформации, и эпюры сил прокатки убеждаемся, что минимальной продольной деформации соответствует сечение максимальной силы, (сечение 9). Данный анализ подтверждает ту идею, которая была сформулирована выше для профилей ободьев колес. Металл перемещается из областей большего обжатия и давления в области с меньшим обжатием и давлением, в данном случае формируя контуры отставания и опережения.

Появление сдвиговых деформаций на сравнительно небольшой по толщине заготовки в зоне перехода от замочной части к перьевой, является свидетельством разнонаправленного течения металла в центральных и поверхностных слоях, рис. 10. В центральной по высоте зоне металл перемещается в направлении замковой части, формируя контур отставания. В поверхностных слоях перемещение металла происходит в противоположном направлении, под действием втягивающих сил трения [4]. Если сопоставить данную область течения с эпюрами сил прокатки в этой зоне, рис. 18, то можно убедиться, что эпюра сил имеет своеобразный «провал». Снижение силы прокатки в сечениях 2–6 профиля нельзя объяснить незначительным изменением высотного обжатия в этой зоне. Обжатие меньше предельного, однако, по величине оно сопоставимо с максимальным. Перепад силы прокатки от «провала» к максимуму составляет в указанных сечениях 40...60 %. В данной зоне очага деформации сдвиговые деформации являются определяющими, рис. 13, такой характер течения металла изменяет напряженное состояние полосы, силу прокатки.

На рис. 14 представлен «свидетель» в поперечном сечении профиля. Характер течения напоминает характер течения металла при осадке. Деформация в центре заготовки и на периферии разная. Распределение по объему находится в соответствии с распределением деформации типа «ковочного креста».

### ВЫВОДЫ

В условиях неравномерной деформации по ширине и длине очага деформации металл стремится переместиться из областей с большей деформацией в области с меньшим обжатием, образуя линии раздела течения металла.

При прокатке наклонных участков профиля в металле в поперечном направлении возникают сдвиговые деформации.

Появление интенсивных сдвиговых деформаций в тонкостенной части профиля при периодической прокатке изменяет напряженное состояние полосы, снижает силу прокатки.

Интенсивная высотная деформация концевых участков профиля способствует перемещению металла в поперечном направлении в сторону менее обжимаемого элемента, что приводит к утяжке, а не уширению, элемента и всего профиля в целом.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чигиринский В. В. *Исследование и совершенствование технологического процесса прокатки сложных несимметричных профилей – автоободов* : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / В. В. Чигиринский. – Днепропетровск, 1979. – 250 с.
2. Кресанов Ю. С. *Исследование и разработка процесса продольной периодической прокатки заготовок лопаток авиационных газотурбинных двигателей* : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04 / Ю. С. Кресанов. – Харьков, 1979. – 208 с.
3. Чекмарев А. П. *Экспериментальное исследование продольной периодической прокатки* / А. П. Чекмарев, А. Ф. Смольянинов // *Производство и применение экономичных профилей проката* : сб. трудов. – Днепропетровск, 1961. – С. 135–150.
4. Целиков А. И. *Теория расчета усилий в прокатных станах* / А. И. Целиков. – М. : Металлургиздат, 1962. – 494 с.

Чигиринский В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ЗНТУ;

Кресанов Ю. С. – канд. техн. наук, вед. инж. ПАО «Мотор Сич»;

Качан А. Я. – д-р техн. наук, проф. ЗНТУ;

Богуслаев А. В. – канд. техн. наук, вед. инж. ПАО «Мотор Сич».

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

ПАО «Мотор Сич» – Публичное акционерное общество «Мотор Сич», г. Запорожье.

E-mail: valerij@zntu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 20.10.2012 г.