

Рис. 4. Изменение микротвердости по толщине рессорных полос стали 50ХГФА в зависимости от усилия нанесения рельефа

различие по структурам, а микро- субструктурные изменения конкретной фазы. При максимальном усилии нанесения рельефа $P=22330$ кг расстояние между насечками вдоль верхней части полосы составляет 1725 мкм с максимумом микротвердости (4600 МПа), расположенном на расстоянии порядка 875-1200 мкм, т.е. практически посередине между насечками. При усилии нанесения рельефа $P=12705$ кг расстояние между насечками составляет 1750 мкм, максимальное значение – 3200 МПа, и пик смещен влево. А при $P=2887.5$ кг и расстоянии между насечками 1775 мкм максимум микротвердости достигает 2850 МПа со смещением вправо. Смещение пиков значений при постоянном характере графиков обусловлено сдвиговой деформацией.

Для нижней поверхности рессор расстояние между насечками составляло порядка 900 мкм. Максимальное значение микротвердости 5220-4030 МПа. Пик максимума для всех образцов отвечает середине между насечками. Величина значений микротвердости возрастает с увеличением усилия нанесения рельефа.

Выводы

Повышение стойкости опытных рессорных полос при испытаниях на усталостную прочность обусловлено нанесением

линий макрорельефа, однако влияние усилия нанесения рельефа сказывается только при значительной деформации нагружения $P=12705$ и 22330 кг.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Степаненко В.А., Томило В.А. Способы перераспределения остаточных напряжений в упругих элементах подвески транспортных средств // Прогрессивные технологии обработки металлов давлением: Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика АН БССР В.П.Северденко. – Мн., 2004. – С.60-65.
2. Дмитривич Д.И., Румянцев И.Н., Томило В.А. и др. Схемы поверхностной пластической деформации и их влияние на структуру и свойства рессорно-пружинных сталей // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию Физико-технического института НАН Беларуси – Мн., 2006. – С. 331-338.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007

УДК 621.771.63

Клубович В.В., Томило В.А.

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПРОКАТКИ ЗАГОТОВОК МАЛОЛИСТОВЫХ РЕССОР

Введение. Автомобилестроение на сегодняшний день основной потребитель черных и цветных металлов. Оптимальный путь увеличения объема производства и повышения качества выпускаемой продукции при ограниченных природных ресурсах – разработка новейших технологий, позволяющих повысить ресурс машин, узлов и агрегатов при минимальной их металлоемкости. Большие возможности в этом отношении имеет периодическая прокатка, которая позволяет максимально приблизить размеры и форму заготовки к геометрическим параметрам самого изделия. При этом значительно повышается коэффициент использования материала, снижается себестоимость выпускаемой продукции, увеличивается производительность, сокращается количество кузнечно-штамповочного оборудования и технологической оснастки.

Достаточно ощутимыми оказались достижения периодической прокатки в рессорном производстве, а точнее при изготовлении малолистовых рессор, широко применяемых в последнее время в различных транспортных средствах. До-

статочно сказать, что практически все автомобильные заводы США, Англии, Франции, Германии, Японии и других развитых стран применяют рессорную подвеску, изготовленную из листов переменной толщины. Это позволяет снизить массу каждой рессоры в среднем на 30%, а долговечность повысить в среднем более чем 1,5 раза по сравнению с вариантом многолистовой рессоры.

В то же время, несмотря на очевидные преимущества малолистовых рессор, автопроизводители СНГ по ряду причин не смогли освоить их широкое промышленное производство. Во многом это сдерживается сложностью самого процесса периодической прокатки, отличающегося нестационарными условиями формообразования, а именно: переменное обжатие полосы по длине, различные температурные условия в начале и в конце процесса деформирования, изменение величины опережения и другие факторы. В связи с этим существенно усложняется расчет геометрии деформирующего инструмента и конструкция технологического оборудования.

Одним из основных способов получения полос с переменным по длине профилем, нашедшим промышленное применение, является прокатка полосы в приводных валках постоянного диаметра с изменяющимся в процессе деформирования межвалковым зазором. Именно этот принцип заложен в технологии и оборудовании известной немецкой фирмы "Daniel Heuзер", которые используют в настоящее время практически все мировые производители малолистовых рессор. Эта технология, хотя и позволяет получать заготовки малолистовых рессор достаточно высокого качества, не может быть повсеместно использована ввиду высокой стоимости оборудования и лицензии. Причем, высокая стоимость оборудования "Daniel Heuзер" вызвана не только тем, что фирма является монополистом в данной области, но и объективно высокой его себестоимостью, связанной с большой сложностью и металлоемкостью.

Новые способы и технологии периодической прокатки.

Учеными БНТУ и ФТИ НАН Беларуси совместно со специалистами Минского автомобильного завода был разработан принципиально новый способ формообразования заготовок малолистовых рессор (рис 1), в соответствии с которым нагретую заготовку 1 центральной частью прижимают к торцу профилированной с двух сторон оправки 2 и с помощью направляющих роликов, при поступательном перемещении оправки, симметрично изгибают до полного прилегания заготовки к поверхности оправки, после чего производят прокатку в неприводных валках 3 с фиксированным межвалковым зазором [1]. По окончании процесса прокатки заготовку снимают с оправки и разгибают для обеспечения прямолинейности. При движении оправки в направлении прокатки происходит непрерывное возрастание обжатия валками заготовки и формирование окончательного (параболического) профиля, определяемого геометрией продольного контура оправки, диаметром валков и межосевым расстоянием.

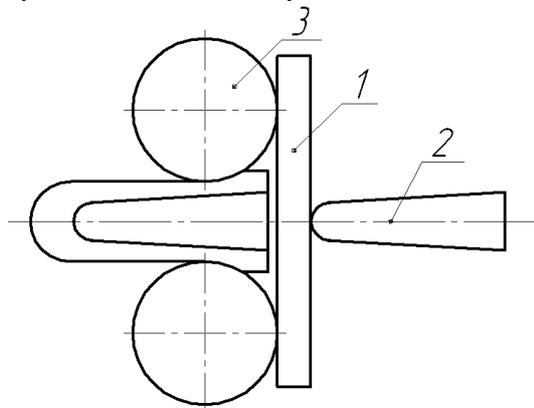


Рис. 1. Схема прокатки параболических заготовок малолистовых рессор на профильной оправке

В приведенной схеме прокатки валки являются неприводными. Поэтому заготовка в процессе обжатия постоянно прижата к торцу оправки, что исключает смещение заготовки относительно профилированных рабочих поверхностей оправки в направлении перемещения последней. Известно, что уменьшение диаметра бочки валков приводит к снижению распорного усилия на них и тем самым способствует повышению точности профиля прокатанных полос [2]. Кроме того, уменьшение диаметра валков приводит к увеличению коэффициента вытяжки и снижению величины уширения, которое существенно влияет на перераспределение металла по длине заготовки и, следовательно, на упругие характеристики полученных полос переменной толщины. Вместе с тем уменьшение диаметра валков ограничено снижением их жесткости, а также условиями захвата металла. В нашем случае это ограничение сводится к условию вращения непривод-

ных валков. При прокатке в неприводных валках очаг деформации в общем случае включает зоны отставания и опережения (рис.2). Резерв сил контактного трения, передаваемый от металла к валкам, в зоне опережения играет активную роль и обеспечивает вращение валков. В зоне отставания силы контактного трения реактивны и препятствуют вращению валков. Поэтому вращение неприводных валков в процессе деформации возможно лишь при условии, когда протяженность зоны опережения будет больше протяженности зоны отставания, а именно $\alpha/2 \leq \gamma \leq \alpha$, где α – угол прокатки, γ – нейтральный угол. Предельное ограничение по данному условию $\alpha = \gamma$ показывает, что в этом случае резерв активных сил контактного трения в зоне опережения исчерпан. Это приводит к остановке валков, и процесс прокатки переходит в протяжку, что вызывает локальный износ самих валков.

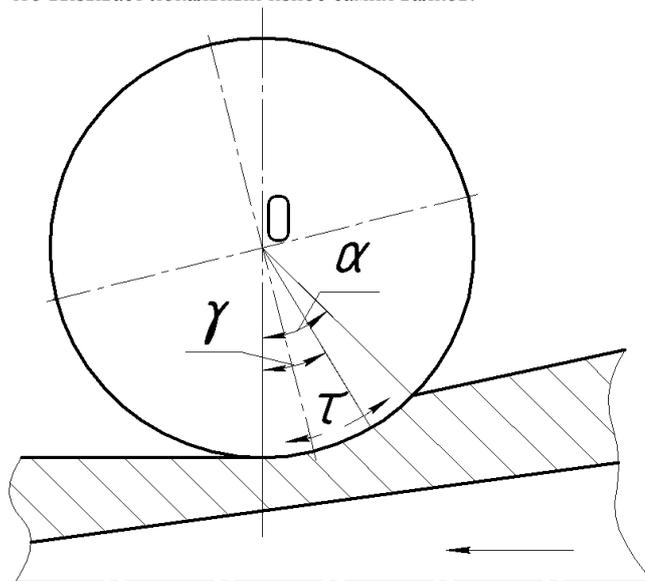


Рис. 2. Схема очага деформации при прокатке с переменным обжатием полосы на оправке

Способ изготовления полос с переменным по длине профилем и оборудование для его осуществления защищены 10 авторскими свидетельствами бывшего СССР, патентами Республики Беларусь, Великобритании, США и Германии.

Внедрение новой технологии осуществлено на Минском рессорном заводе. Несмотря на промышленное освоение, постоянно ведутся работы по усовершенствованию способа и технологии прокатки заготовок и дальнейшему освоению новых типов малолистовых рессор. На сегодняшний день освоены и успешно прошли стендовые и ходовые испытания передние и задние малолистовые рессоры автомобилей семейства МАЗ, рессоры для микроавтобусов и грузовиков малой грузоподъемности "Газель", "РАФ", "Люблин", прицепов к легковым автомобилям "Зубренок". В рамках международного сотрудничества разработаны технологии получения упругих элементов подвески для грузовых автомобилей "Стар" и "Мерседес".

Многие зарубежные фирмы проявили большой интерес к данной технологии. Американская фирма "Итон Корпорэйшн" (Детройт) приобрела лицензию на производство заготовок малолистовых рессор. Интерес американских автопроизводителей к разработкам белорусских ученых показателен хотя бы тем, что, имея в своем распоряжении семь установок "Daniel Heuзер", крупнейший производитель рессор на американском континенте фирма "Eaton" делает все возможное для внедрения на своих заводах новейших технологий. На одном из дочерних предприятий этой фирмы (г. Чадем, Канада) под руководством и непосредственным участием сотрудников ФТИ НАН Беларуси,

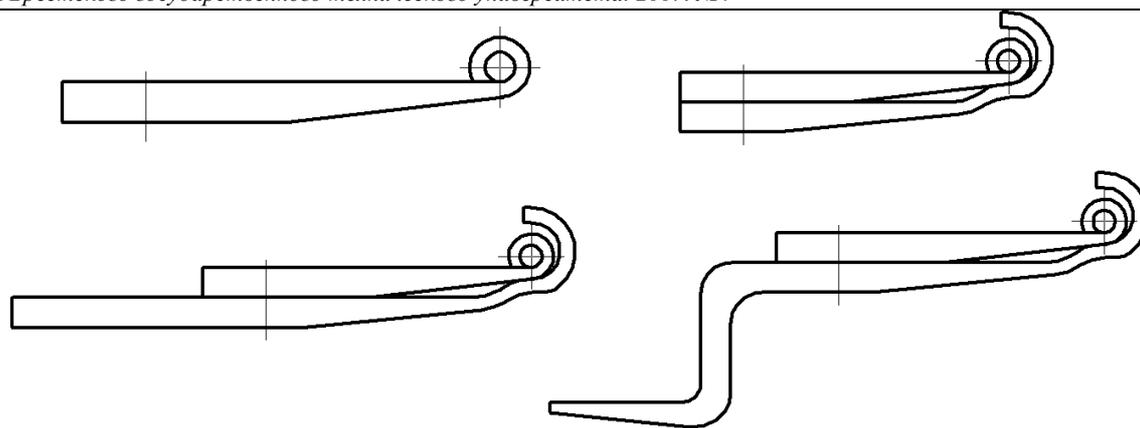


Рис. 3. Различные конструкции направляющего элемента пневмоподвески большегрузных автомобилей

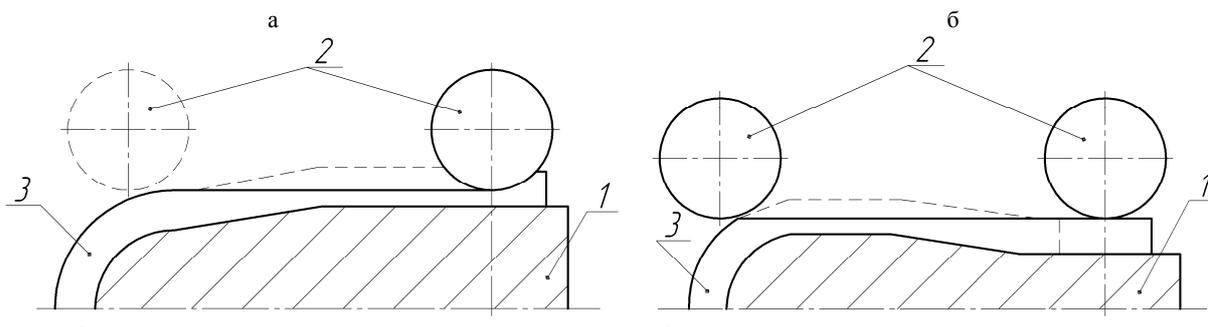


Рис. 4. Схемы прокатки: а) - с нарастающим обжатием, б) - с убывающим обжатием: 1 – профильная оправка; 2 – прокатные валки; 3 – заготовка

БНТУ и МАЗа спроектирована, изготовлена и запущена в производство автоматическая линия по изготовлению заготовок малолистовых рессор по данной технологии. Производительность этой автоматической линии достигает двух тысяч заготовок за смену. Планируется расширения ассортимента рессор, изготавливаемых по разработанной технологии.

В последнее время в практике конструирования подвески транспортных средств, в частности, для автомобилей большой грузоподъемности, все большее внимание привлекают конструкции с использованием пневмоподушки, установленной в комбинации с направляющим элементом (рис. 3).

Поскольку, используемый в конструкции пневмоподвески направляющий элемент представляет собой заготовку переменной толщины, аналогично как в малолистовой рессоре, принято решение об использовании способа, при котором исходная заготовка (сечением 100x45), предварительно изгибаемая перед прокаткой на подвижной профильной оправке, деформируется в нескольких валковых калибрах. Затем формоизмененная полоса разделяется на две заготовки, точно соответствующие требуемым геометрическим параметрам направляющего элемента.

Однако проведенные теоретические расчеты показали невозможность получения направляющих элементов пневмоподвески с перепадом толщин от 45 до 20 мм (обжатие 25 мм) на существующем прокатном оборудовании, установленном на Минском рессорном заводе, по причине ограниченной мощности гидропривода последнего. Для стабильной прокатки заготовок направляющих элементов по существующей схеме требуется увеличение мощности стана в 1,8 – 2 раза, что влечет за собой необходимость разработки и изготовления прокатного стана значительно большей мощности. Учитывая высокую стоимость и длительность изготовления уникального прокатного оборудования, было принято решение усовершенствовать существующий способ прокатки. Поэтому теоретические исследования были направлены, во-первых, на обеспечение относительно стабильного в течение процесса

деформирования значения распорного усилия на элементах прокатной клетки, во-вторых, на обеспечение относительно невысоких значений усилия, расходуемого на продвижение оправки, что, с одной стороны, позволит обеспечить заданную точность геометрических размеров периодического профиля (одно из важнейших требований к упругим элементам подвески транспортных средств), а, с другой стороны – отказаться от проектирования уникального гидропривода подвижной оправки и воспользоваться установленным на Минском рессорном заводе прокатном оборудовании.

На рис. 4 представлены ранее предложенные и используемые в настоящее время на Минском рессорном заводе классическая схема получения заготовок переменного по длине сечения (рис. 4а) и усовершенствованная схема для получения направляющих элементов пневмоподвески (рис. 4б). По форме основного деформирующего элемента (рабочей клиновидной оправки) схему, представленную на рис. 4а, можно определить как прокатку с нарастающим обжатием, а на рис. 4б – с убывающим обжатием. При прокатке с нарастающим обжатием высота профиля заготовки рессоры убывает в направлении от носка оправки к основанию. При прокатке с убывающим обжатием высота профиля, напротив, возрастает от носка к основанию оправки. Для упрощения расчетов прокатку участка переменного профиля для обеих схем деформирования можно рассматривать как прокатку заготовки в двух валках (одного приводного – бесконечно большого диаметра, другого неприводного определенного диаметра) с межосевым расстоянием, изменяющимся по определенному закону, обусловленному профилем оправки [3]. В частном случае (применительно к прокатке направляющих элементов пневматической подвески), когда образующая участка переменного профиля имеет форму прямой, закон изменения межосевого расстояния принимаем линейным. Очевидно, что в способе прокатки с нарастающим обжатием процесс можно рассматривать как прокатку в двух равномерно приближающихся валках. При прокатке с убывающим обжатием, напротив, валки равномерно раздвигаются.

При этом усилии прокатки, по сравнению с прокаткой полосы равной толщины в первом случае - увеличивается, а во втором - уменьшается. Учитывая вышеизложенное, а также принимая во внимание возможности существующего оборудования, было принято решение использовать способ прокатки с убывающим обжатием как базовый.

Уравнения для определения нормальных контактных напряжений в очаге деформации получены совместным решением уравнений равновесия (уравнения прокатки) и пластичности Губера-Мизеса. Для составления уравнения равновесия поверхность калиброванной оправки заменяли цилиндрической поверхностью валка, близкой к хорде, имеющего существенно больший радиус, чем катающий валок [3]. Тогда для зоны опережения

$$\sigma_y - \sigma_x = \frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(1 - 3 \frac{\tau_{xy}^2}{\sigma_s^2}\right)}, \quad (1)$$

а для зоны отставания

$$\sigma_{yот} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{1-f^2} \left(1 + \ln \frac{h_0}{h_x}\right) + 2f \left(\arctg \sqrt{\frac{h_0}{h_k} - 1} - \arctg \sqrt{\frac{h_x}{h_k} - 1} \right) \sqrt{\frac{2R_0 \cdot R_p}{(R_0 + R_p)h_k}} \right] \sigma_s, \quad (2)$$

где $\Psi = \sqrt{1-f^2} \left(\frac{R_0 - R_p}{R_0 + R_p}\right)^2$; R_0, R_p - соответственно ради-

усы большого и катающего валков; h_0, h_k - соответственно толщина полосы на входе и на выходе из валков; ξ - коэффициент переднего натяжения; σ_s - напряжение текучести.

При выборе мощности привода подвижной оправки необходимо определить толкающее усилие обеспечивающего возможность деформации полосы в клети прокатного стана. Поскольку толкающее оправку усилие затрачивается на создание переднего натяжения и активных сил контактного трения на поверхности оправки в пределах очага деформации, запишем

$$P_{оп} = 2B\sigma_s \left[\frac{2}{\sqrt{3}} l_d f + h_k (1 - \xi) \right], \quad (3)$$

УДК 921/793

Девойно О.Г., Оковитый В.А., Шевцов А.И., Ильющенко А.Ф., Подвойский А.П.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Введение. В настоящее время все более широкое применение находят технологические методы, использующие высокоэнергетические источники нагрева. В связи с этим, актуальным является моделирование таких процессов, что позволяет решить задачи оптимизации для их разнообразных технологических применений. Моделированию тепловых процессов при высокоэнергетической обработке посвящено большое количество работ, которые отличаются по степени сложности, методам численной реализации, количеству допущений и гранич-

ных условий. В такой ситуации потребителям расчетных моделей не всегда просто сориентироваться в большом объеме информации и остановиться на оптимальном варианте модели, поэтому представляется актуальным проанализировать состояние вопроса в области моделирования высокоэнергетическими источниками и обобщить и на этой основе получить физико-математическое описание основных процессов применительно к обработке газотермических покрытий.

где B - ширина полосы; l_d - длина очага деформации. Значение коэффициента переднего натяжения определим из условия

$$\sigma_{yот} \Big|_{h_x=h_H} - \sigma_{yон} \Big|_{h_x=h_H} = 0, \quad (4)$$

где h_H - толщина полосы в нейтральном сечении или в развернутой форме.

Отсюда с учетом выражений (2) найдем

$$\xi = \frac{2}{\sqrt{3}} \Psi \left(1 + \ln \frac{h_H}{h_k}\right) + 1 - \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\sqrt{1-f^2} \left(1 + \ln \frac{h_0}{h_H}\right) + 2f \left(\arctg \sqrt{\frac{h_0}{h_k} - 1} - \arctg \sqrt{\frac{h_H}{h_k} - 1} \right) \sqrt{\frac{2R_0 \cdot R_p}{(R_0 + R_p)h_k}} \right]. \quad (5)$$

Очевидно, что с ростом обжатия, начиная с определенных значений степени деформации, зависящих от R_p и f , происходит рост коэффициента переднего натяжения. С увеличением обжатия коэффициент переднего натяжения достигает максимально допустимой величины, после чего возможен обрыв переднего конца полосы.

Выводы. По результатам проведенных исследований спроектирован ряд станов периодической прокатки. Созданы установки для изготовления заготовок малолистовых рессор большегрузных автомобилей МАЗ, легковых автомобилей и прицепов к ним. Весь комплекс оборудования изготовлен отделом станкостроения и кузнечно-штамповочным производством Минского автозавода. В настоящее время на Минском рессорном заводе функционируют две полуавтоматическая линии, полностью обеспечивающие потребность Минского автозавода в малолистовых рессорах и направляющих элементах пневмоподвески для автомобилей и полуприцепов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. 1839121 Россия, МКИ В21Н 8/00. Способ изготовления изделий переменного по длине профиля / А.В.Степаненко, В.А.Король, Г.А.Исаевич.
2. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. - М., 1970.
3. В.В. Клубович, В.А. Томило. Технологии изготовления и обработки специальных периодических профилей. - Мн., 2007.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007

Девойно О.Г., д.т.н., проф., профессор Белорусского национального технического университета.

Оковитый В.А., к.т.н. ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Шевцов А.И., к.т.н., ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Ильющенко А.Ф., д.т.н., профессор ГНУ «Институт порошковой металлургии».

Подвойский А.П., аспирант ГНУ «Институт порошковой металлургии».