СТРУКТУРА МЕТАЛЛА В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ЗОНАХ ТРУБНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

ДЕМЕНТЬЕВ В. Б., ЗАСЫПКИН А. Д., МОКРУШИНА М. И.

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН,
426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрены вопросы влияния структуры приповерхностного слоя упрочненного проката, применяемого для изготовления деталей, испытывающих высокие нагрузки при эксплуатации, на процессы трещинообразования. Наличие дефектного слоя на поверхности проката, расположенного в области обезуглероживания, обуславливает применение механической обработки для его удаления, что экономически нецелесообразно в условиях массового производства. Необходимость данной технологической схемы вызвана и постоянно повышающимися требованиями к качеству поверхности готовых деталей (пальцев траков гусеничных машин, торсионов, валов и осей различного назначения и т.п.), изготавливаемых из горячекатаного сплошного и трубного проката, для высоконагруженных образцов техники (высокие статические и динамические нагрузки). При обработке тел вращения в зависимости от диаметра и длины заготовок могут быть в ряде случаев найдены схемы обработки, имеющие преимущества даже перед точением. Например, при проектировании нового оборудования для зачистки наружной поверхности цилиндрических заготовок целесообразной схемой обработки может быть высокотемпературная термомеханическая обработка с деформацией винтовым обжатием с одновременным удалением окалины в процессе деформации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: структура стали, обезуглероженный слой, механические свойства, нагрев, деформация, охлаждение, высокотемпературная термомеханическая обработка, показатели качества поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие дефектного слоя на поверхности проката, используемого в качестве заготовки для высоконагруженных деталей, обуславливает необходимость его полного удаления. В процессе производства цилиндрических деталей в зависимости от размеров заготовок могут быть использованы схемы обработки, имеющие преимущества даже перед токарной обработкой. Например, при проектировании нового оборудования для зачистки наружной поверхности цилиндрических заготовок целесообразной схемой обработки может быть высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) с одновременным удалением окалины в процессе деформации.

С целью повышения качества внутренней поверхности трубных заготовок разработан метод удаления окалины в режиме ВТМО с деформацией винтовым обжатием (ВО), включающей нагрев, деформацию трубной заготовки в горячем состоянии в неприводной трехроlikовой головке с тангенциальным качением роликов и охлаждение. Отслоение окалины производят в процессе деформации на водоохлаждаемой оправке с гребнем (рис. 1), установленном на расстоянии 0.2..., 0.3 длины калибрующей части от заборного конуса деформирующих роликов, а удаление окалины из зоны деформации производят паром, проходящим в зону отслоения окалины через зазоры между оправкой и заготовкой.

Винтовое обжатие горячей трубы на водоохлаждаемой оправке с гребнем позволяет производить отслоение окалины с внутренней поверхности за счет образования волны, идущей перед гребнем, при коэффициенте редуцирования $K_p = 0.77..., 0.93$. Из-за своей хрупкости окалина успешно отделяется от основного металла. Установка гребня оправки на расстоянии $C = 0.2..., 0.3$ длины калибрующей части от начала конического участка роликов

На рис. 1 представлена схема удаления окалины с внутренней поверхности трубы, на рис. 2 – участки перегиба волны, образующейся на внутренней поверхности, на рис. 3 – отверстия между оправкой и заготовкой, где С – расположение гребня оправки на цилиндрическом участке деформирующих роликов; L_k – длина калибрующей (цилиндрической) части деформиющего ролика.

Рис. 1. Термодинамическая диаграмма процесса удаления окалины с внутренней поверхности трубы из стали 30ХГСН2А (а) и линии изменения температуры, характеризующие метод ТМО по классификации М.Л. Бернштейна (б)

Удаление окалины происходит следующим образом. Заготовка 1 подается в осевом направлении с вращением, последовательно проходя разогрев в индукторе 2, обжатие в роликах 3 на оправке 4 и закалку в наружном стрейере 5 и внутреннем 6 (рис. 2). Гребень 7 оправки 4 выводится на расстояние $C = (0.2... 0.3)L_k$ от начала заборного конуса деформирующих роликов 3. В этом случае возникают условия появления двух участков перегиба волны a и b (рис. 3).

Рис. 2. Участки перегиба волны деформации на внутренней поверхности трубы.
Обозначения см. рис. 1

Рис. 3. Поперечное сечение заготовки в зоне деформации между оправкой и заготовкой.
Обозначения см. рис. 1

На основании физических причин отказов в работе изучаются вопросы качества деталей машин и связанные с ним условия и следствия, приводящие к отказам. Варьирование свойств различных изделий при их изготовлении и эксплуатации хорошо объясняется технологической наследственностью [1].

Явления переноса свойств деталей от предшествующих технологических операций к последующим можно назвать технологической наследственностью. Постоянство этих свойств у деталей машин называют технологическим наследованием. Терминология является достаточно емкой и позволяет широко осветить процесс появления заготовки, или даже материала для нее, с ее состоянием в любой момент времени вплоть до превращения в деталь [1].

Основой наследственной информации является собственно материал детали, а также характеристики ее поверхности с многообразием параметров, описывающих состояние этих поверхностей. Многочисленные носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции, в ходе которых они могут изменять свои свойства частично или полностью. Характерной операцией, замедляющей или

полностью исключаящей передачу наследственных свойств, может быть термическая обработка [1]. На основании вышесказанного, последовательность проведения исследований для установления технологических взаимосвязей осуществлялась в соответствии с очередностью операций технологического процесса от получения заготовки до готовой детали [2].

В технологическом процессе исследуются самые различные свойства обрабатываемой детали. Важную роль играет собственно технологическая система. Обеспечение качества деталей в технологическом процессе проявляется по следующим направлениям. Размеры и форма объекта разработки, предложенная конструктором, уже порождает геометрические отклонения, возникающие при его изготовлении. Суть явления сводится к тому, что заготовки в зависимости от конструкции имеют различную жесткость или температурные деформациями в разных точках под действием силовых параметров или нагрева и получают в ходе технологического процесса или эксплуатации различные перемещения, вызывающие погрешности готовых деталей [1].

В процессе нагрева осесимметричных заготовок под деформацию выясняется, что теплоотдача у торцов значительно больше, чем в центре заготовки. Поэтому температурные деформации в середине ее оказываются большими, чем у торцов, что проявляется при охлаждении детали в виде отклонения от цилиндричности. Например, при ВТМО нагревание заготовки оказывается неравномерным, то отклонения распределяются по очень сложным законам, но по-прежнему наблюдается их зависимость от конструкции детали (геометрия образующих трубчатых изделий всегда связана с конструктивными особенностями внутренней поверхности) [1].

Большое значение имеет влияние на качество деталей свойств материала обрабатываемых заготовок. Несовершенства заготовок, поученные ими в металлургическом производстве, носят наследственный характер и если они не удаляются, то проявляются после обработки резанием в виде закатов, раковин [3]. Металлургический цикл определяет появление многих дефектов заготовок. Выявление наследственных дефектов происходит обычно на финишных операциях, когда уже поздно что-либо предпринимать. Замечено, что проявление винтового следа от деформирующего инструмента на наружной поверхности трубы обработанной ВТМО ВО заготовки является необратимым дефектом, что характеризуется различными значениями твердости на выступах и впадинах. Тем не менее и это свойство винтового обжатия можно рассматривать как отрицательно, так и положительно влияющее на качество деталей, в зависимости от вида нагружения при эксплуатации (изгиб, износ, контактное выкрашивание и т. п.).

Показатели качества деталей – точность размеров, отклонение формы, взаимное расположение поверхностей, твердость, шероховатость, уровень напряжений в поверхностном слое и другие определяются в ходе технологического эксперимента. При этом учитывается вероятностная природа характеристик технологического процесса, что позволяет активнее использовать явление технологического наследования на стадии проектирования и реализации [4]. Определенный интерес приобретает использование положений технологической наследственности при определении качества деталей в ходе их эксплуатации. Так, в случае многократной перешлифовки валков холодной прокатки ленты, изменение твердости по сечению вала различно для каждой детали, что является причиной неравномерности их износа в равных интервалах времени работы стана. Вопросы технологического обеспечения качества деталей машин решаются на базе проектирования типовых технологических процессов, рассчитанных на широкую номенклатуру деталей, часто повторяющиеся элементы (полые пальцы, валы, оси и т. п.). Наглядным примером может служить технологический процесс производства упрочненных горячекатаных трубных осесимметричных заготовок, содержащий такие операции, как прошивка, редуцирование, ВТМО ВО, финишная механическая обработка. При развитии таких технологических процессов возможно получение типовой заготовки для широкого перечня деталей машиностроения, эксплуатирующихся в условиях динамических нагрузок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения свойств приповерхностных слоев металла трубных заготовок были проведены металлографические исследования трех типоразмеров заготовок пальцев гусеничных машин (табл. 1). Полые пальцы работают в условиях асимметричного изгибного нагружения и подвержены воздействию агрессивных сред. Поэтому поверхностные слои материала деталей обрабатываются наилучшим образом и не должны содержать характерных способу производства дефектов [5, 6].

Таблица 1

Режимы ВТМО ВО и размеры образца

№ образца	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Режимы ВТМО					Схема ВТМО
			λ , %	S , мм/об	$T_{\text{деф}}$, °C	$T_{\text{нагр}}$, °C	$V_{\text{охл}}$, град/с	
6	31.3	10	20-24	3.0-3.5	980	1000	60	ДО
7	31.0	15	25	5.0	960-980	980-1000	70-100	КО
14	22.0	10	25	5.0	960-980	980-1000	70-100	КО

ДО – на длинной оправке; КО – на короткой оправке.

Проведение исследований дефектов на трубах после операций прошивки и редуцирования показало, что в поверхностном слое имеются такие дефекты проката, как остатки окалины, морщины, рябизна, прокатные плены (по наружной поверхности), раскатные и травильные трещины (классификация поверхностных дефектов по ГОСТ 20847-75). Использование результатов этих исследований [7, 8] позволило получить качественную поверхность (рис. 4 – 6), устойчивую к реальным условиям нагружения гусеницы при эксплуатации. Долговечность упрочненных деталей превысила долговечность штатных пальцев до пяти раз, что соизмеримо с величиной полного моторесурса гусеничной машины.

Способ удаления окалины, изложенный в [9], позволяет проводить удаление образовавшейся в металлургическом цикле окалины и получать качественную бездефектную поверхность заготовки, не нарушая технологической последовательности производства. Анализ результатов показывает, что источником всех дефектов, имеющих в заготовке после ВТМО, являются дефекты, появившиеся при прошивке и особенно при редуцировании.

Следовательно, для получения бездефектной упрочненной трубной заготовки необходимо включение в технологический процесс операции удаления дефектного слоя перед ВТМО на глубину 0.8..., 1.0 мм либо в процессе ВТМО или на последующих за упрочнением операциях шлифования и зачистки абразивным инструментом на глубину 0.7..., 0.8 мм.

Тот факт, что все дефекты поверхности в большинстве случаев не выходят за пределы обезуглероженного слоя подчеркивает его решающее значение при определении глубины дефектного слоя проката на каждом этапе технологического процесса. Таким образом, использование методики [6, 10] для расчета величины обезуглероженного слоя при ВТМО позволит прогнозировать качество поверхностного слоя горячекатаных трубных заготовок пальцев гусеницы, и, как следствие, определять долговечность изделия в целом.

Поверхность

Основа

a)

Поверхность

Основа

б)

в)

Рис. 4. Образец 6: *a)* – внешний край, *б)* – внутренний край, *в)* – основа

Рис. 5. Образец 7: *a)* – внешний край, *б)* – внутренний край, *в)* – основа

Поверхность

Основа

a)

Поверхность

Основа

б)

в)

Рис. 6. Образец 14: *a)* – внешний край, *б)* – внутренний край, *в)* – основа

Приведенные в табл. 2 значения микротвердости показывают оптимальное сочетание структуры (рис. 4 – 6) и механических свойств стали 30ХГСН2А в приповерхностной области упрочненных полых заготовок на внутренней и наружной поверхностях [6, 7].

Таблица 2

Значения микротвердости по глубине толщины стенки упрочненной трубы из стали 30ХГСН2А от поверхности к основе

№ образца	HV0.1, край	HV0.1, 1,5-2,0 мм от края	HV0.1, основа	Примечания
6	внешний – 467 внутренний – 425	внешний – 419 внутренний – 548	583	разброс значений у края
7	внешний – 644 внутренний – 325	внешний – 502 внутренний – 572	504	разброс в значениях у основы и переходящей зоны
14	внешний – 640 внутренний – 472	внешний – 552 внутренний – 504	554	разброс в значениях у основы и переходящей зоны

Измерения проводились на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке $P = 100$ г.

Металлографический анализ образцов проводили на микроскопе Neophot-21, травление шлифов осуществляли 4 % – спиртовым раствором азотной кислоты.

Согласно литературным данным и анализируя значения микротвердости, можно сделать следующие выводы:

Образец 6, 7. Микроструктура внешнего края образца представляет собой мартенсит (мартенсит деформации). На расстоянии 2 мм от края она переходит в троостомартенсит и такой же остается в основе металла.

У поверхности внутреннего края – троостит, на расстоянии 2 мм от края троостомартенсит, основной металл – троостомартенсит.

Образец 14. Микроструктура внешнего края – мартенсит, далее переходит в троостомартенсит.

На рис. 4 – 6 представлены характерные структуры приповерхностных зон и основы, позволяющие получать максимальную долговечность изделий из упрочненной ВТМО ВО стали 30ХГСН2А. Мероприятия, проведенные для получения представленных структур, совместно с картиной остаточных технологических напряжений по сечению трубчатого пальца, позволяют надеяться на создание условий равной вероятности зарождения очагов усталостных трещин в опасных сечениях детали [5]. Таким образом, показана реальная возможность организации производства упрочненных полых пальцев траков гусеничных машин $\varnothing 22 \times 10$ мм, 30×10 мм и 30×15 мм с увеличенным моторесурсом и сниженным на 10 – 12 % весом детали.

ВЫВОДЫ

Показаны структуры в местах появления вероятных очагов зарождения усталостной трещины при асимметричном знакопостоянном изгибе на внутренней и наружной поверхности при испытании полых цилиндрических деталей, изготовленных из горячекатаных труб. Установлено, что снижение шероховатости поверхности до $R_{\max} \leq 10$ мкм совместно с сочетанием структуры поверхностного слоя (мартенсит + троостомартенсит) на глубине до 2 мм создает условия максимального повышения ресурса полых деталей при различных видах нагружения, соизмеримого с моторесурсом гусеничной машины в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников К. С., Баландин Г. Ф., Дальский А. М. и др. Технологические основы обеспечения качества машин / под общ. ред. К. С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
2. Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д., Спичкин Н. А. Оценка точности геометрических размеров труб с ВТМО // Известия Высших учебных заведений. Черная металлургия. 1990. № 9. С. 41-43.
3. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 223 с.
4. Суслев А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.
5. Шаврин О. И., Дементьев В. Б., Маслов Л. Н., Засыпкин А. Д. Качество поверхности цилиндрических изделий с термомеханическим упрочнением. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2006. 178 с.
6. Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д. Особенности формирования обезуглероженного слоя при ВТМО // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 4. С. 521-527.
7. Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д. Исследование структуры и механических свойств стали 30ХГСН2А в технологиях прошивки, редуцирования и высокотемпературной термомеханической обработки особотолстоенных трубных заготовок // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17, № 3. С. 372-379.
8. Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д. Структура дефектов проката и их удаление скальпированием при высокотемпературной термомеханической обработке // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 4. С. 514-520.
9. Дементьев В.Б., Засыпкин А.Д. Образование и удаление окалины при ВТМО горячекатаной полой заготовки // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2008. № 1. С. 49-52.
10. Дементьев В. Б., Засыпкин А. Д. Определение величины обезуглероженного слоя при ВТМО трубных заготовок // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2001. № 8. С. 47-48.

Metal structure in surface zones of tubes of chromonickel steel with high-temperature thermomechanical processing

Dementiev V. B., Zasyupkin A. D., Mokrushina M. I.

Udmurt Federal Research Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia

SUMMARY. The article discusses the impact of the structure of the surface layer of hardened steel used for the manufacture of parts experiencing high loads during operation, on the processes of crack formation. The presence of a defective layer on the surface of the car, located in the area of decarburization, determines the use of mechanical treatment to remove it, which is not economically feasible in mass production. The need for this technological scheme is also caused by constantly increasing demands on the quality of the surface of finished parts (fingers of tracks of tracked vehicles (GM), torsion bars, shafts and axles for various purposes, etc.) made of hot-rolled (hot-rolled) solid and pipe products, for highly loaded models of equipment (high static and dynamic loads). When processing bodies of revolution, depending on the diameter and length of the workpieces, machining schemes can be found in some cases that have advantages even over turning. For example, when designing new equipment for cleaning the outer surface of cylindrical billets, a suitable processing scheme may be high-temperature thermomechanical processing (HTTT) with screw compression (VO) deformation with simultaneous removal of scale during deformation.

KEYWORDS: steel structure, decarburized layer, mechanical properties, heating, deformation, cooling, high-temperature thermomechanical processing, surface quality indicators.

REFERENCES

1. Kolesnikov K. S., Balandin G. F., Dal'skiy A. M. i dr. *Tekhnologicheskie osnovy obespecheniya kachestva mashin* [Technological basis for quality assurance of machines]. Pod obshch. red. K. S. Kolesnikova. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 256 p.
2. Dement'ev V. B., Zasyupkin A. D., Spichkin N. A. Otsenka tochnosti geometricheskikh razmerov trub s VTMO [Assessment of the accuracy of the geometric dimensions of pipes with HTMO]. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy], 1990, no. 9, pp. 41-43.
3. Dal'skiy A. M. *Tekhnologicheskoe obespechenie nadezhnosti vysokotochnykh detaley mashin* [Technological support for the reliability of high-precision machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975. 223 p.
4. Suslov A. G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [Surface layer quality of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2000. 320 p.

5. Shavrin O. I., Dement'ev V. B., Maslov L. N., Zasyupkin A. D. *Kachestvo poverkhnosti tsilindricheskikh izdeliy s termomekhanicheskim uprochneniem* [Surface quality of cylindrical products with thermomechanical hardening]. Izhevsk: IPM UrO RAN Publ., 2006. 178 p.
6. Dement'ev V. B., Zasyupkin A. D. Osobennosti formirovaniya obezuglerozhennogo sloya pri VTMO [Features of the formation of the decomposition layer at HTMO]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 4, pp. 521-527.
7. Dement'ev V. B., Zasyupkin A. D. Issledovanie struktury i mekhanicheskikh svoystv stali 30KhGSN2A v tekhnologiyakh proshivki, redutsirovaniya i vysokotemperaturnoy termomekhanicheskoy obrabotki osobotolstostennykh trubnykh zagotovok [The research of the structure and mechanical properties of steel 30KhGSN2A in the technologies of the piercing, reduction and high-temperature thermomechanical treatment of heavy-walled pipe blanks]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2015, vol. 17, no. 3, pp. 372-379.
8. Dement'ev V. B., Zasyupkin A. D. Struktura defektov prokata i ih udalenie skal'pировaniem pri vysokotemperaturnoy termomekhanicheskoy obrabotke [Structure of rocks defects and their removal by scalping at high-temperature thermomechanical treatment]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 4, pp. 514-520.
9. Dement'ev V. B., Zasyupkin A. D. Obrazovanie i udalenie okaliny pri VTMO goryachekatanoy poloj zagotovki [Scale formation and desculling at high-temperature mechanical working of hot-rolled hollow tube round stell]. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy], 2008, no. 1, pp. 49-52.
10. Dement'ev V. B., Zasyupkin A. D. Opredelenie velichiny obezuglerozhennogo sloya pri VTMO trubnykh zagotovok [Determination of the size of the decarburized layer at HTMT of pipe billets]. *Traktory i sel'skohozyajstvennye mashiny* [Tractors and agricultural machines], 2001, no. 8, pp. 47-48.

Дементьев Вячеслав Борисович, доктор технических наук, руководитель Института механики УдмФИЦ УрО РАН, тел. (3412) 20-29-25, e-mail: demen@udman.ru

Засыпкин Андрей Дмитриевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ИМ УдмФИЦ УрО РАН, тел. (3412) 20-29-25, e-mail: oka592@rambler.ru

Мокрушина Марина Ивановна, младший научный сотрудник, Научный центр металлургической физики и материаловедения УдмФИЦ УрО РАН, тел. (3412) 21-88-55