



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-3-71-78>
УДК 621.98.04

Поступила 15.06.2020
Received 15.06.2020

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИБКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

В. А. ТОМИЛО, М. Л. НЕСТЕРОВИЧ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости 65. E-mail: maxim03021992@gmail.com

В статье рассмотрены вопросы получения высокопрочных сталей. На основании исследования микроструктуры был сделан вывод о воздействии температуры на исследуемую сталь. Для проверки влияния процесса сварки на изучаемую сталь измеряли твердость сварного шва и зоны термического влияния. В дальнейшем сварной шов проверяли рентгенотелевизионным контролем на предмет дефектов сварного соединения.

Для анализа возможности свободной гибки с локальным нагревом были проведены эксперименты по отпуску образцов с целью выявления его оптимальной температуры, при котором не происходит образование трещин в исследуемых сталях после гибки. Проведены эксперименты по изгибу изучаемых сталей после локального нагрева линии гибки.

Проведено сопоставление результатов обмера твердости сварного шва, а также образцов, полученных после отпуска и локального нагрева линии гибки. Построены графики падения твердости изучаемой стали в зависимости от температуры отпуска, а также падения твердости по мере удаления от линии локального нагрева. Проведены эксперименты по изгибу со сжатием высокопрочных сталей с применением подложки.

Полученные в ходе экспериментов образцы исследовали рентгенотелевизионным контролем на предмет определения дефектов линии гибки. Рассчитана величина сжимающих напряжений, действующих на изгибаемый образец.

Ключевые слова. Микроструктура стали, твердость сварного шва, изгиб с локальным нагревом, изгиб со сжатием.

Для цитирования. Томило, В. А. Исследование процесса гибки высокопрочных сталей / В. А. Томило, М. Л. Нестерович // *Литье и металлургия*. 2020. № 3. С. 71–78. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-3-71-78>.

RESEARCH OF HIGH STRENGTH STEELS BENDING

V. A. TAMILA, M. L. NESTEROVICH, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti Ave. E-mail: maxim03021992@gmail.com

The article deals with the issues of obtaining high-strength steels. A conclusion about the effect of the temperature on the steel was drawn based on the research of the microstructure. To check the effect of the welding process on the steel under study, the hardness of the weld and the zone of thermal influence were measured. The weld was checked by X-ray television control for defects in the weld joint.

To analyze the possibility of free bending with local heating experiments on tempering samples were conducted in order to identify its optimum temperature at which no cracking occurs in the steels after bending. Bending experiments were carried out after local heating.

A comparison of the results of measuring the hardness of the weld, as well as samples obtained after tempering and local heating of the bending line were made. Graphs of the drop in hardness of the studied steel depending on the tempering temperature, as well as the drop in hardness as it moves away from the local heating line, are constructed. Bending experiments with compression of high-strength steels were performed using a substrate material.

The samples obtained during the experiments were examined by X-ray for defects in the bending line. The value of compressive stresses acting on bent sample is calculated.

Keywords. Microstructure of steel, hardness of weld, bending with local heating, bending with compression.

For citation. Tamila V.A., Nesterovich M.L. Research of high strength steels bending. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 3, pp. 71–78. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-3-71-78>.

Введение

В настоящее время при изготовлении усиленных элементов кузовов автомобилей широкое применение нашли высокопрочные стали типа Miilux Protection. Особенность данных сталей заключается в их механических свойствах: твердости – 320–560 НВ, пределе текучести $\sigma_T = 800\text{--}1250$ МПа и пределе прочности $\sigma_B = 1000\text{--}1600$ МПа [1]. Такие механические свойства в стали возможно получить несколькими способами:

наклепом (нагартовкой); подбором химического состава и оптимальной термической обработки; термомеханической обработкой.

С целью выявления специфики изготовления исследуемой стали Miilux Protection 500 были изучены химический состав и механические свойства (табл. 1), а также проведен анализ микроструктуры (рис. 1).

Таблица 1. Химический состав и механические свойства стали Miilux Protection 500

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Mo, %	Ni, %	Cu, %	P, %	S, %	Al, %	Ti, %	V, %	B, %
0,272–0,288	0,27–0,52	1,24–1,27	0,31	0,004–0,034	0,04–0,07	0,01–0,011	0,010–0,011	0,003–0,005	0,034	0,040–0,041	0,007–0,009	0,002
Предел текучести σ_T , МПа				Предел прочности σ_B , МПа				Твердость НВ				
1250				1600				480–560				

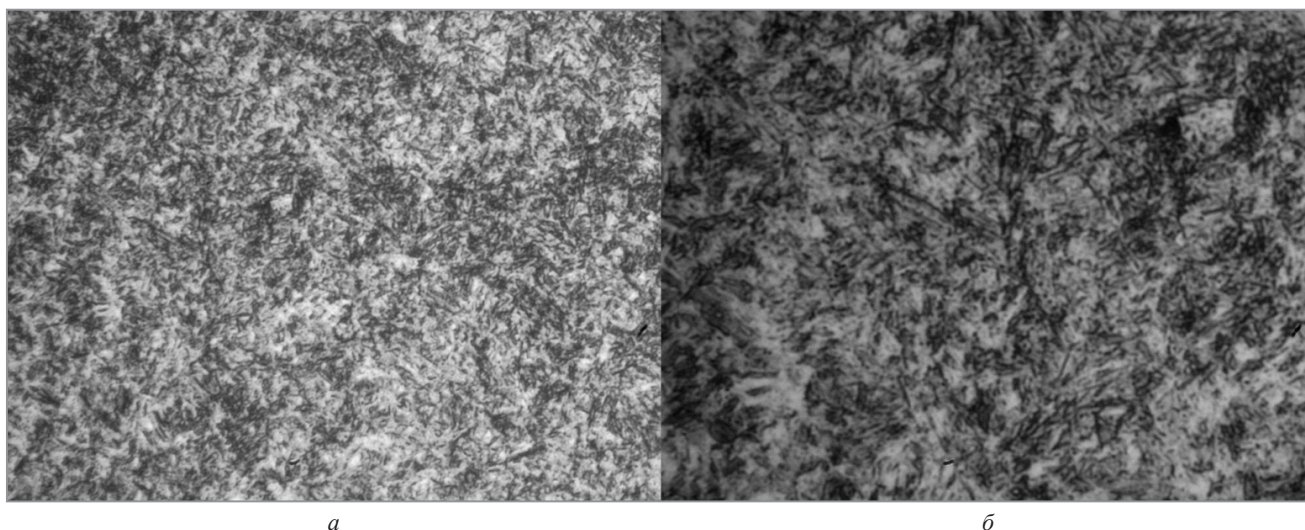


Рис. 1. Микроструктура стали Miilux Protection 500: а – $\times 200$; б – $\times 500$

Структура стали Miilux Protection 500 имеет игольчатый вид, что с учетом механических свойств характерно для мартенситных сталей. Получить мартенситную структуру возможно в процессе термической и термомеханической обработки.

При применении стали Miilux Protection 500 на производстве приходится прибегать к сварному варианту изготовления деталей. Это связано с тем, что, по рекомендациям производителя, во избежание образования трещин вдоль линии гибки такую сталь возможно изгибать при соблюдении отношения радиуса кривизны пуансона к толщине материала $\frac{r}{S} = (6-8)$ и отношения расстояния между кромками матрицы к толщине материала $\frac{W}{S} = (15-19)$ [1]. Для усиленных элементов кузовов автомобилей это недопустимо – радиус в детали становится в разы больше толщины материала, что влияет на общую жесткость изогнутых элементов. Однако сварка таких элементов также влечет за собой негативные явления: увеличение трудоемкости сборки, снижение стойкости кузова по сварному шву, необходимость в проектировании и изготовлении большого количества сборочно-сварочных приспособлений и оснастки. При этом снижение стойкости элементов кузова по сварному шву является определяющим для конечной массы изделия, так как в связи с этим приходится прибегать к приварке усилителей с тыльной стороны (рис. 2).

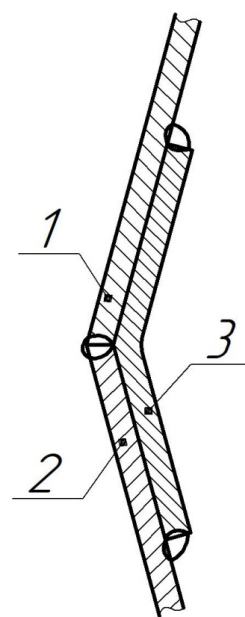


Рис. 2. Схема приварки усилителей при сборке кузовов автомобилей:
1, 2 – детали из стали Miilux Protection 500;
3 – усилитель сварного шва

Как отмечалось выше, сталь Miilux Protection 500 имеет структуру, которую возможно получить в процессе термической или термомеханической обработки. Качество такой обработки (термической или термомеханической), как правило, определяется твердостью в сочетании с микроструктурой, полученной в ходе фазовых превращений. Тогда при сварке исследуемых сталей сварной шов и зона термического влияния будут иметь механические свойства, отличные от основного металла. Это связано с тем, что при горении сварочной дуги происходит выделение большого количества тепла, что приводит к изменению структуры металла в зоне термического влияния. Для анализа снижения твердости по сварному шву и в зоне термического влияния в условиях ОАО «МЗКТ» были сварены между собой три пластины из стали Miilux Protection 500. Схема сварки показана на рис. 3. Сварку осуществляли по рекомендациям поставщика стали.

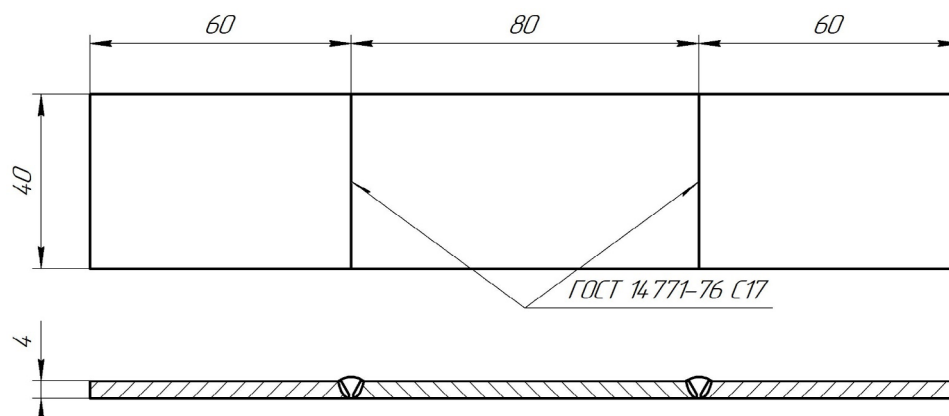


Рис. 3. Схема сварки пластин из стали Miilux Protection 500

После подготовки сваренного образца производили обмер твердости сварных швов и околошовных зон на расстоянии до 15 мм (рис. 4, табл. 2).



Рис. 4. Сваренный образец из стали Miilux Protection 500

Т а б л и ц а 2 . Твердость сварных швов в образце

Номер сварного шва	Сварной шов, НВ	ЗТВ ₅ (в обе стороны), НВ	ЗТВ ₁₀ , НВ	15 мм от сварного шва, НВ
1	288–295	339–356	431–455	492–513
2	276–294	339–351	434–449	486–499

Из таблицы видно, что приведенные ранее суждения верны, и при сварке пластин из стали Miilux Protection 500 прослеживается снижение твердости, связанное с изменением структуры металла в зоне термического влияния из-за воздействия сварочной дуги. Снижение твердости наблюдается на ширине зоны термического влияния до 10 мм в обе стороны, далее выравнивается до состояния поставки.

Однако снижение твердости – не последнее негативное явление, возникающее при сварке сталей Miilux Protection 500. Также возможно появление таких дефектов, как трещины, поры, непровар, нарушение формы шва и т.п. Исправление их возможно, но это увеличивает трудоемкость изготовления деталей. Для проверки качества сварных соединений образец исследовали в условиях ФТИ НАН Беларуси с помощью системы рентгенотелевизионного контроля X-Cube 225 kV (рис. 5).

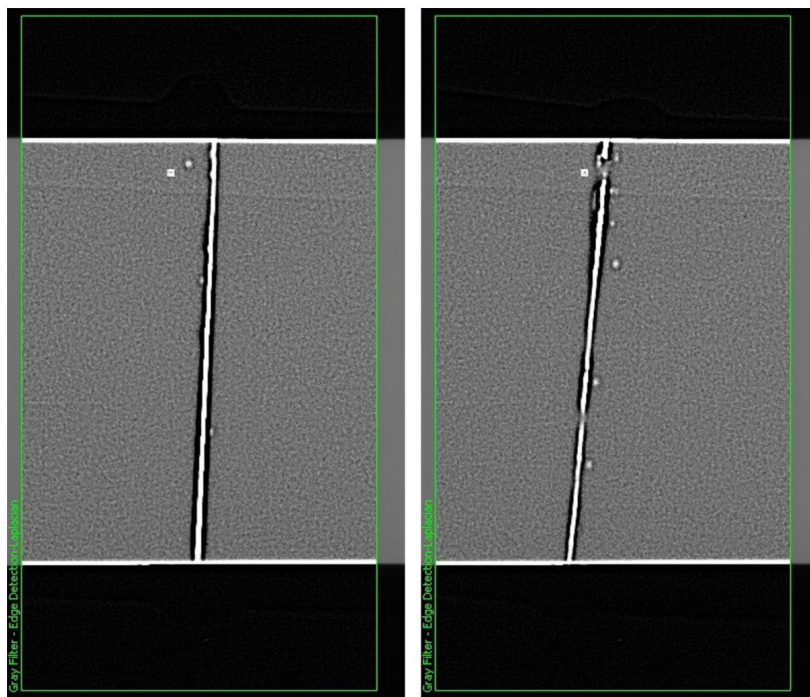


Рис. 5. Рентгенограмма сварных швов

Белые точки, расположенные в зоне сварного шва (рис. 5) – образовавшиеся поры – дефект, который делает сварное соединение неплотным и уменьшает его механическую прочность. Избежать большого количества сварных соединений при сборке усиленных элементов кузовов автомобилей, а, следовательно, образующихся в процессе сварки дефектов, возможно. Для этого необходима замена сварных соединений гнутыми элементами с радиусами, равными толщине материала. Получить такой радиус в детали ($r = s$) возможно при гибке сталей с локальным нагревом (отпуском).

Для анализа возможности гибки сталей Miilux Protection 500 с применением локального нагрева (отпуска) были выбраны шесть образцов размером 4x40x150 мм. Согласно данным производителя, при их нагреве свыше 200 °С изменяются механические свойства. Снижаются предел текучести, прочности, твердость [1]. В ходе эксперимента пять образцов подвергали низкому, среднему и высокому отпуску, после чего фиксировали их твердость. Далее образец в состоянии поставки и образцы, полученные после отпуска, изгибали на листогибочном прессе. Радиус гибки пуансона был равен толщине материала $r = s = 4$ мм, расстояние между кромками матрицы $W = 40$ мм. Результаты обмера твердости гибки образцов на различные углы приведены в табл. 3.

Таблица 3. Изгиб образцов из стали Miilux Protection 500 после их отпуска

Температура отпуска, °С	Твердость НВ	Результат гибки на угол, град			Критический угол изгиба, град
		30	45	90	
-	480–560	Без разрушения	Трещина	Трещина	32
300	406–452	То же	То же	То же	34
400	383–408	То же	То же	То же	37
500	309–316	То же	Без разрушения	То же	62
600	265–277	То же	То же	Без разрушения	-
700	206–215	То же	То же	То же	-

На рис. 6 показаны зависимости падения твердости стали Miilux Protection 500 от температуры ее отпуска. Как видно из таблицы, образец, подвергнутый отпуску при температуре 600 °С, был согнут на угол 90 ° без трещин, причем твердость образца сопоставима с твердостью сварных швов (см. табл. 2). Несколько выше твердость была у образца, отпущенного при температуре 500 °С, а критический угол изгиба, при котором произошло трещинообразование, составил 62 °. Это также следует принять во внимание в случае изгиба деталей с градусной мерой угла до 60 °.

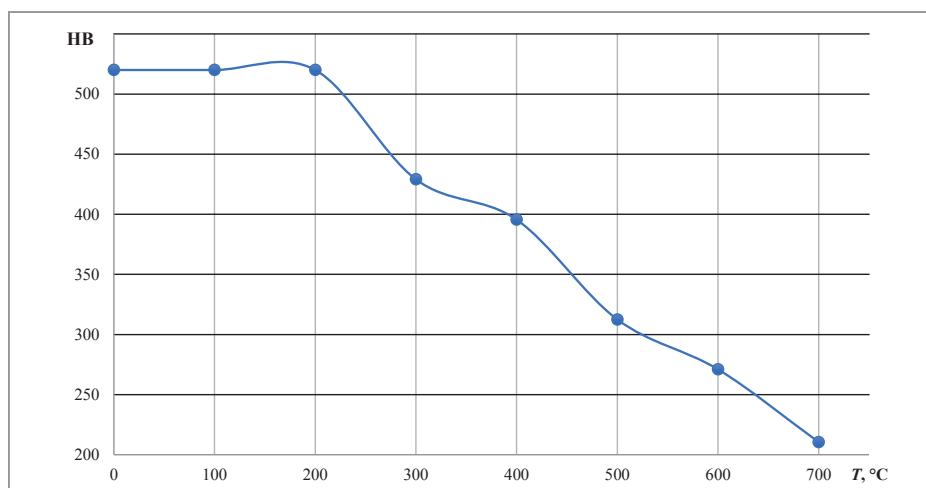


Рис. 6. Зависимость твердости стали Miilux Protection 500 от температуры отпуска

С целью сравнения твердости по линии гибки после локального нагрева с твердостью образца, подвергнутого отпуску при температуре 600 °C в условиях ОАО «МЗКТ», был проведен следующий эксперимент. Два образца из стали Miilux Protection 500 размером 4x40x150 мм предварительно подвергали локальному нагреву от газового резака до температуры 600 ± 10 °C. Нагрев проводили в предполагаемом месте гибки образцов, ширина линии нагрева достигала 10 мм, что ориентировочно равно длине дуги радиуса срединной поверхности после гибки. Температуру фиксировали с помощью оптического пирометра DT-8835 с диапазоном измерений от -50 до 800 °C. Образцы остывали на спокойном воздухе, после чего изгибались на угол 90°. Радиус гибки пуансона был равен толщине материала $r = s = 4$ мм, расстояние между кромками матрицы $W = 40$ мм, трещины после гибки отсутствовали. Далее в образцах фиксировали твердость с постепенным удалением от радиуса срединной поверхности к краям. Результаты обмера приведены в табл. 4. Изменение твердости в образцах на различном расстоянии от срединной поверхности, а также изменение твердости сварных швов образца (см. табл. 2) показаны на рис. 7.

Таблица 4. Твердость образцов после локального нагрева

Номер образца	Твердость на различных расстояниях от радиуса срединной поверхности НВ					
	по радиусу	5 мм	10 мм	15 мм	20 мм	25 мм
1	279–286	341–350	446–464	488–512	492–516	490–520
2	277–288	339–346	454–462	492–509	488–512	488–514

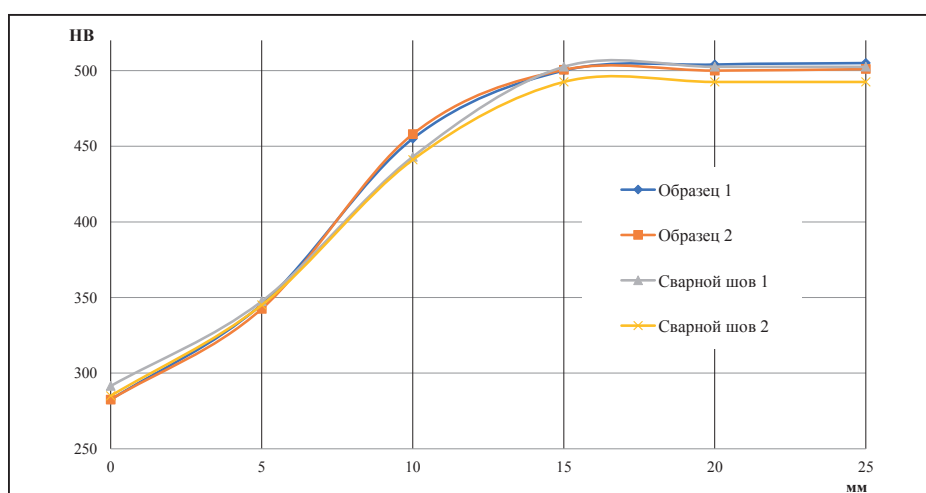


Рис. 7. Твердость стали Miilux Protection 500 в сваренном образце и образцах, полученных после гибки с локальным нагревом

Из таблицы и рисунка следует, что твердость по радиусу срединной поверхности сопоставима с твердостью сварных швов (см. табл. 2), а также с твердостью образца, который подвергали отпуску

при температуре 600 °С (см. табл. 3). При этом твердость на расстоянии до 10 мм от радиуса срединной поверхности сопоставима с твердостью зоны термического влияния сварного шва, а уже далее выравнивается до твердости стали в состоянии поставки.

Исходя из проведенных экспериментов гибки с локальным нагревом стали Miilux Protection 500, можно сделать вывод, что рассмотренный способ изгиба пригоден для замены большого количества сварных соединений при изготовлении усиленных элементов кузовов автомобилей, что положительно скажется на эстетическом виде готового кузова автомобиля и позволит снизить трудоемкость сборки за счет уменьшения зачистки наружных сварных соединений. Однако главный недостаток способа гибки с локальным нагревом, как и у сварного варианта изготовления, – снижение стойкости кузова по линии гибки. В связи с этим приварка усилителя по схеме (см. рис. 2) неизбежна, что не позволит снизить общую массу кузова автомобиля.

В [3, 4] были рассмотрены способы гибки сталей Miilux Protection 500 на радиус, равный толщине материала с применением силовой интенсификации – осевого сжатия. Данный способ гибки позволит сохранить стойкость по линии изгиба, и вместе с тем, снизить массу кузова автомобиля, так как отпадает необходимость приварки усилителя с тыльной стороны (см. рис. 2).

С целью предварительной проверки технологии гибки со сжатием [3,4] в условиях ОАО «МЗКТ» был проведен эксперимент по схеме, приведенной на рис. 8. Суть его заключается в следующем: во фрезерованный паз подложки из листового проката ($S = 12$ мм, сталь 09Г2С ГОСТ 19281–2014, класс прочности 345) устанавливали сегмент из стали Miilux Protection 500. Далее подложку вместе с сегментом укладывали на матрицу листогибочного пресса сегментом вверх и изгибали радиусом пуансона $r = 4$ мм, расстояние между кромками матрицы было равно $W = 60$ мм.

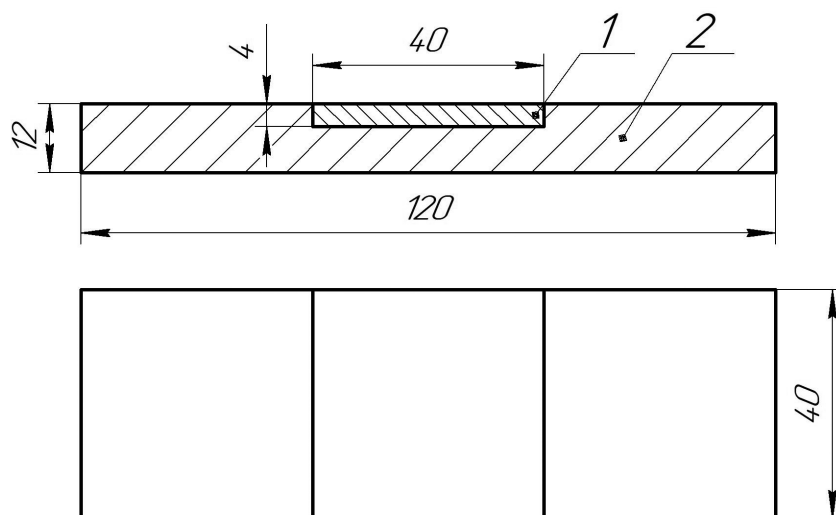


Рис. 8. Схема проведения эксперимента:
1 – сегмент из стали Miilux Protection 500; 2 – подложка из стали 09Г2С

При такой толщине подложки сегмент из стали Miilux Protection 500 изгибается в условиях осевого сжатия, так как радиус нейтрального слоя (при котором произойдет смена знаков тангенциальных напряжений) в подложке равен [5]:

$$r_n = \sqrt{Rr} = \sqrt{16 \cdot 4} = 8 \text{ мм},$$

где R – радиус наружной поверхности подложки после гибки: $R = 16$ мм; r – радиус гибки: $r = 4$ мм.

Радиус на наружной поверхности изгибаемого сегмента также будет равен 8 мм и совпадет с радиусом нейтральной поверхности подложки. В таком случае растягивающие тангенциальные напряжения будут присутствовать только в подложке, что и позволит изгибать сегмент из стали Miilux Protection 500 в условиях осевого сжатия. В результате проведения ряда экспериментов трещин после гибки сегмента с подложкой не наблюдалось. Фотографии изогнутого сегмента и подложки приведены на рис. 9.

Для того чтобы убедиться в отсутствии внутренних трещин (микротрещин) вдоль линии гибки, полученные в результате экспериментов сегменты из стали Miilux Protection 500 исследовали в условиях ФТИ НАН Беларуси с помощью системы рентгенотелевизионного контроля X-Cube 225 kV. Фотографии исследования на наличие дефектов вдоль линии гибки приведены на рис. 10.



Рис. 9. Результат эксперимента изгиба сегмента из стали Miilux Protection 500 в условиях осевого сжатия

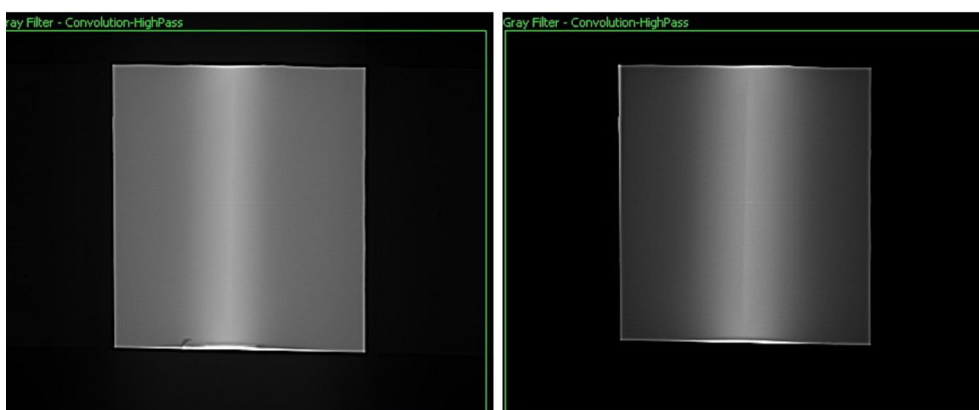


Рис. 10. Рентгенограмма сегментов из стали Miilux Protection 500

Светлая линия на фотографиях – линия гибки, причем дефекты вдоль линии гибки отсутствуют.

В [3,4] отмечалось, что для препятствия образованию трещин вдоль линии гибки к торцам изгибаемой заготовки из стали Miilux Protection 500 необходимо приложить такую сжимающую силу, чтобы образованные от нее сжимающие напряжения достигли напряжений текучести. Однако, как показал эксперимент, в случае изгиба со сжатием стали Miilux Protection 500 величина таких напряжений может быть меньше. Так, в нашем случае, сжимающие напряжения, воздействующие на сегмент, были равны напряжениям, образованным в зоне сжатия подложки. Рассчитать их величину возможно, используя формулу распределения тангенциальных напряжений. Зона сжатия в подложке с учетом расчета радиуса нейтрального слоя будет находиться в пределах $4 \leq \rho \leq 8$. Отсюда [5]

$$\sigma_{\theta} = -\sigma_{\tau} \left(\ln \frac{\rho}{r} + 1 \right) = \left| \begin{array}{l} \rho = 8 \\ \rho = r = 4 \end{array} \right| = \begin{array}{l} -584,13 \\ -345 \end{array} \text{ МПа,}$$

где σ_{τ} – предел текучести стали 09Г2С: $\sigma_{\tau} = 345$ МПа по ГОСТ 19281–2014.

Таким образом, для препятствия образованию трещин при изгибе сталей Miilux Protection 500 радиусом, равным толщине материала, достаточно, чтобы вызванные осевой сжимающей силой сжимающие напряжения составили не менее 584,13 МПа.

Выводы

Усиленные элементы кузовов автомобилей из сталей Miilux Protection 500 возможно изготавливать несколькими способами: сварной вариант, изгиб с локальным нагревом, изгиб со сжатием. Причем каждый из способов имеет свои достоинства и недостатки. Так, при сварном варианте изготовления механические свойства шва будут заметно отличаться от свойств металла в состоянии поставки. В таком случае сварной шов становится слабым местом и требует усиления для сохранения своей стойкости.

Изгиб с локальным нагревом позволит значительно сократить трудоемкость изготовления усиленных элементов кузовов автомобилей, а также сделает его вид более эстетичным за счет уменьшения

количества зачищаемых сварных швов. Но при этом линия гибки после локального нагрева также будет требовать усиления, так как термическое воздействие на сталь Miilux Protection 500 приводит к изменению ее механических свойств по аналогии со сварным вариантом изготовления.

Способ же гибки со сжатием является наиболее предпочтительным среди рассмотренных в статье способов получения усиленных элементов кузовов автомобилей. С его помощью возможно получать гнутые детали без трещин, с радиусом, равным толщине материала, что позволит сохранить жесткость и стойкость кузовной детали по линиигиба. В случае применения способа изгиба со сжатием также отпадет необходимость приварки усилителя с тыльной стороны, что позволит снизить массу кузова автомобиля. Однако данный способ может оправдать себя лишь при больших сериях производства автомобилей, так как требуются изготовление гибочной оснастки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт Miilux OY [Электронный ресурс] / Защитные стали. – 2020. – Режим доступа: <https://www.miilux.fi/> ru. – Дата доступа: 1.03.2020.
2. **Фиргер, И. В.** Термическая обработка сплавов: справ. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. 304 с.
3. **Клубович, В. В.** Технология гибки высокопрочных сталей / В. В. Клубович, В. А. Томило, М. Л. Нестерович // *Металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр.* Минск: БНТУ, 2019. Вып. 40. С. 212-220.
4. **Томило, В. А.** Технология и инструмент для гибки листов из высокопрочных сталей / В. А. Томило, М. Л. Нестерович // *Литье и металлургия.* 2020. № 1. С. 50-55.
5. **Попов, Е. А.** Основы теории листовой штамповки: учеб. пособ. для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.

REFERENCES

1. <https://www.miilux.fi/ru>
2. **Firger I. V.** *Termicheskaja obrabotka splavov* [Heat treatment of alloys]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982, 304 p.
3. **Klubovich V. V., Tomilo V. A., Nesterovich M. L.** Tehnologija gibki vysokoprochnyh stalej [Technology for bending high-strength steels]. *Metallurgija: respublikanskij mezhdostvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: republican interdepartmental collection of scientific papers.* Minsk, BNTU Publ. 2019, Vyp. 40, pp. 212–220.
4. **Tomilo V. A., Nesterovich M. L.** Tehnologija i instrument dlja gibki listov iz vysokoprochnyh stalej [Technology and tools for bending sheets of high strength steels]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 50-55.
5. **Popov E. A.** *Osnovy teorii listovoj shtampovki* [The basics of sheet metal stamping theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 278 p.