

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»**

Факультет профессионального образования

Направление подготовки 22.03.02 Metallургия

Направленность (профиль) Обработка металлов и сплавов давлением
программы бакалавриата

Кафедра Технических дисциплин

Зав. кафедрой

_____ Т.О. Сошина
« ___ » _____ 2020 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

На тему: «Влияние технологических остаточных напряжений, возникающих при
холодной листовой прокатке, на качество готовой продукции»

Студент Носков Александр Сергеевич

Состав выпускной квалификационной работы:

1. Пояснительная записка на ____ стр.
2. Графическая часть на ____ листах.

Руководитель

выпускной квалификационной работы _____ / Балабанов Д.С. /

Лысьва, 2020

Реферат

В выпускной квалификационной работе рассматриваются технологические остаточные напряжения, которые возникают в готовой продукции в процессе ее изготовления и оказывают влияние на его качество. В качестве готовой продукции рассматривается металлический лист, который получается методом холодной прокатки. В работе сделан обзор существующей литературы по данной тематике, описан процесс холодной листовой прокатки металла, причины возникновения технологических остаточных напряжений, существующие методы определения технологических остаточных напряжений, изучены технологические параметры холодной листовой прокатки, оказывающие влияние на формирование остаточных напряжений, влияние остаточных напряжений на качество готовой продукции и методы снижения этих напряжений.

					<i>ВКР.2020-ПЗБ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		2

Введение

Холодная прокатка как способ изготовления листов методами обработки металлов давлением нашла широкое применение, как в черной, так и в цветной металлургии.

Практически все технологические процессы изготовления металлопродукции методами пластического деформирования связаны с формированием в готовых изделиях самоуравновешенной системы остаточных напряжений [1]. При этом **актуальной задачей** является установление влияния технологии на уровень и характер распределения остаточных напряжений, которые могут достигать значительных величин, вплоть до предела текучести и прочности материала при суммировании с напряжениями от действия внешних сил, что может привести к разрушению конструкций еще при хранении или в первые часы эксплуатации даже при достаточно низком уровне эксплуатационных нагрузок, а также оказать существенное влияние на надежность и долговечность машин и механизмов. Уровень остаточных напряжений является во многих случаях важным параметром, определяющим качество изделий, полученных в результате пластического деформирования [2].

Проведя обзор имеющейся литературы, посвященной исследованию механизмов образования технологических остаточных напряжений при холодной прокатке листов, стоит сказать, что работ по данной тематике достаточно мало, а существующие [4], [6], [7] описывают только экспериментальные методы определения остаточных напряжений при прокатке. В работе [2] представлен теоретический способ определения технологических остаточных напряжений, основанный на энергетическом подходе, однако ни в этой, ни в других работах не описаны результаты исследования по влиянию технологических параметров холодной листовой прокатки на величину и характер распределения остаточных напряжений в готовых листах.

В связи с этим **целью** выпускной квалификационной работы является - изучение механизмов образования технологических остаточных напряжений в процессе холодной прокатки листов и влияния основных технологических

										Лист
										4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

1. Холодная листовая прокатка

Прокаткой называется процесс пластического деформирования тел между вращающимися приводными валками. Прокатка относится к числу основных способов обработки металлов давлением. Методом прокатки получают изделия самой разнообразной формы: тонкие и толстые листы, профили квадратного и круглого сечения, уголки, швеллеры, двутавровые балки и др. Как и другие способы обработки давлением, прокатка бывает горячей и холодной. Горячая прокатка распространена шире, чем холодная. Нагретый металл при высоких температурах обладает пониженным сопротивлением деформации и повышенной пластичностью. Холодная прокатка применяется для получения относительно тонких изделий с высококачественной поверхностью. Различают продольную, поперечную и косую прокатку.

В соответствие с ГОСТ 19904 – 90 листовой холоднокатанный прокат выпускается шириной 500 мм и более, изготавливаемый в листах толщиной от 0,35 до 5 мм, в рулонах от 0,35 до 3,5 мм [9].

Сущность процесса прокатки заключается в том, что заготовка или слиток вследствие действия сил трения втягивается вращающимися валками в зазор между ними и обжимается, при этом силы трения должны быть не меньше, чем противодействие деформации, в противном случае, валки начнут буксовать по металлу, и процесс осуществляться не сможет. Противодействие будет увеличиваться с увеличением деформации, таким образом, при процессе прокатки величина деформации не может превосходить определенного предела.

Изобразим схему простейшего процесса прокатки (рисунок 1.1).

При продольной прокатке слиток или заготовка 1 втягивается в зазор между валками 2, вращающимися в разные стороны, обжимается по высоте и увеличивается по длине и ширине, при этом сечение заготовки принимает форму зазора между валками.

										Лист
										6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

6. Проволочные с диаметром валков 250-300 мм, прокатывающие катанку диаметром от 5 до 10 мм.

7. Толстолистовые с длиной бочки валков 2000-5000 мм, предназначенные для производства толстых листов толщиной от 4 до 60 мм.

8. Тонколистовые горячей и холодной прокатки с длиной бочки 700 – 2800 мм.

9. Универсальные, используемые для прокатки универсальных полос шириной от 200 до 1500 мм.

10. Трубные, используемые для производства бесшовных и сварных труб.

11. Колесо- и бандажепрокатные, обеспечивающие получение железнодорожных колес и бандажей. Кроме того, существуют станы для особых (специальных) видов проката – шаропрокатные, для прокатки периодических профилей, зубчатых колес и др.

Прокатка листовой, полосовой стали и ленты производится в валках, имеющих цилиндрическую, слегка бочкообразную или вогнутую рабочую поверхность.

Основные операции технологического процесса проката следующие: подготовка исходного материала, нагрев, прокатка и отделка.

При подготовке исходного металла к прокатке с него удаляют различные поверхностные дефекты, что увеличивает выход готового проката. Эта операция особенно необходима при прокате качественной углеродистой и легированной стали.

Во время прокатки проверяют настройку валков, состояние калибров, заданный режим обжатия. Для контроля за состоянием поверхности проката регулярно отбирают пробы.

После прокатки контроль продолжают во время отделочных операций (резка полос на мерные длины, правки, удаление поверхностных дефектов и т.д.).

Готовый прокат подвергают конечному механическому контролю [8].

										Лист
										11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

рода связаны явления упругого последствия, упругого гистерезиса, изменяемости упругих констант и т.п.

Напряжения третьего рода обязательно сопровождают упрочнение [6].

Основной причиной возникновения остаточных напряжений является неравномерность пластической деформации в процессах холодной обработки давлением. На степень неравномерности деформации определяющее влияние оказывают следующие факторы: механические свойства материала заготовок, величина обжатия, геометрические параметры и форма обжимающей части инструмента, условия трения на контактных поверхностях, сложность формы получаемого изделия [6].

2.2 Остаточные напряжения в листовых изделиях

Листовые и полосовые металлоизделия являются наиболее универсальным и экономичным видом проката, так как их используют в качестве исходного материала для штамповки и сварки разнообразных изделий. Доля листового проката во многих странах превышает 50 %, что вызвано потребностью листа в автомобильной, судостроительной, авиационной, строительной, консервной и других отраслях промышленности[2].

Процесс холодной прокатки является основным в технологии производства холоднокатаной листовой стали как с точки зрения получения проката заданных геометрических размеров с определенными допусками и качеством поверхности, так и обеспечения необходимого уровня различных физико-механических свойств листового металла. Определяющими факторами для достижения вышеуказанных целей являются режим обжатий, суммарная и единичная степень деформации и целый ряд характеристик оборудования: тип стана, жесткость прокатных клетей, характеристики валковой системы, имеющиеся системы автоматизированного регулирования и др [2].

Холодная пластическая деформация сопровождается значительным изменением физико-механических и структурных свойств металла, вызываемым наклепом. Характер этих изменений зависит от химического

					<i>ВКР.2020-ОР.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

Для процессов пластического деформирования методами обработки металлов давлением характерны большие пластические деформации, описываемые теориями пластического течения. При этом характерным является многопереходный процесс изготовления металлоизделий, когда применение известных подходов определения остаточных напряжений еще более усложняется, поскольку проследить историю формирования остаточных напряжений практически невозможно [2].

Экспериментальные методы получили широкое применение при определении напряжений в металлоизделиях после пластической деформации. Экспериментальные методы определения остаточных напряжений можно условно подразделить на две группы: физические и механические, в зависимости от того, какой измеряемый параметр или физическая характеристика принимаются за основу расчета напряжений [2].

В основу всех механических методов положено полное или частичное разрушение элементов конструкций с измерением возникающих при этом деформаций или перемещений, т.е. преднамеренное нарушение равновесия остаточных напряжений. Для измерения межплоскостных расстояний от действия остаточных напряжений используется рентгеновская и нейтронная тензометрия, основанные на закономерностях дифракции нейтронов [2].

В случае применения расчетно-экспериментальных методов аналитически или численно вычисляются значения остаточных напряжений и строятся эпюры их распределения по сечению деталей [2].

При частичном разрушении поверхности разгрузка от напряжений выполняется путем высверливания отверстий, нарезки канавок и вырезки столбиков. Методами отверстий и канавок измеряют деформацию оставшейся части поверхности детали, методом столбиков – деформацию отделяемой части. Деформация регистрируется механическими тензотрами, тензорезисторами, по отпечаткам алмазной пирамиды, рентгеновской тензометрией и другими способами [2].

					<i>ВКР.2020-ОР.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		17

2.4 Энергетический подход к определению остаточных напряжений

Энергетические подходы активно применяются во многих разделах механики сплошных сред, деформируемого твердого тела, разрушения и т.д.

Потенциальная энергия остаточных напряжений сохраняется в скрытом виде в течение длительного времени и подвергается диссипации лишь под воздействием специальной обработки, например отжигом или механической пластификацией, а также релаксацией [2].

При пластическом деформировании часть энергии пластического деформирования сохраняется в деформируемом теле в виде скрытой потенциальной энергии остаточных напряжений. Тогда согласно энергетическому подходу потенциальную энергию остаточных напряжений после пластического деформирования можно представить как часть энергии, пошедшей на пластическое деформирование [5]:

$$U = \psi U_d, \quad (1)$$

где ψ – параметр, определяющий долю энергии пластического деформирования, пошедшую на формирование остаточных напряжений; U_d – энергия пластического деформирования.

При этом потенциальная энергия упругих остаточных напряжений

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV, \quad (2)$$

где V – объем металлоизделия.

Энергия, затраченная на пластическую деформацию заготовки, определяется интегралом

$$U_d = S \int_0^\varepsilon \sigma_s d\varepsilon, \quad (3)$$

где S – площадь сечения заготовки; ε – степень деформации; σ_s – сопротивление деформации материала заготовки.

									Лист
									19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

Сопротивление деформации конструкционных материалов в общем случае зависит от степени деформации.

Сопротивление деформации конструкционных материалов зависит от степени деформации и для большинства металлов и сплавов эта зависимость имеет вид:

$$\sigma_s = \sigma_{s_0} + m\varepsilon^n, \quad (4)$$

где σ_{s_0} – исходное сопротивление деформации металла или предел текучести материала; m, n – эмпирические коэффициенты, характеризующие деформационное упрочнение, определяемые экспериментально; ε – степень пластической деформации.

Так, с учетом соотношения (4) энергия пластического деформирования

$$U_d = S \int_0^{\varepsilon} (\sigma_{s_0} + m\varepsilon^n) d\varepsilon. \quad (5)$$

Из энергетического условия находятся расчетные значения и зависимость технологических остаточных напряжений от основных параметров пластического деформирования и механических свойств обрабатываемого материала [2].

2.5. Напряженное состояние в листах после пластической деформации

В данной главе на основе энергетического подхода определяются остаточные напряжения в полосе, к которой можно отнести и листовые материалы, после пластического деформирования прокаткой.

Считаем, что последеформационному состоянию полосы соответствует упругое напряженное состояние от остаточных напряжений.

									Лист
									20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

2.6 Технологические остаточные напряжения при холодной листовой прокатке

Выше были записаны компоненты тензора остаточных напряжений в полосе, с помощью которых при использовании обобщенного закона Гука в декартовой системе координат можно найти компоненты тензора деформаций ε_{ij} .

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x - 2\mu(\sigma_y + \sigma_z)}{E}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y - 2\mu(\sigma_x + \sigma_z)}{E}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z - 2\mu(\sigma_x + \sigma_y)}{E}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) h dx dy. \quad (13)$$

После подстановки (11) и (12) в (13) и интегрирования для единичной длины полосы получим

$$U = \frac{a_0^2 b^{14} (1 + \mu) \bar{h}^5}{6,3504 \cdot 10^6 E} \left[4\bar{h}^2 (2 + \mu) + 7(1 - \mu) (1 - \bar{h}^4) \right] \quad (14)$$

где $\bar{h} = \frac{h}{b}$ - относительная толщина полосы.

Энергия пластической деформации U_d определим в виде

$$U_d = b \cdot h \cdot \int_0^\varepsilon (\sigma_{s0} + m \cdot \varepsilon^n) d\varepsilon. \quad (15)$$

Степень пластической деформации ε при прокатке распределена по сечению неравномерно, она возрастает от срединной поверхности полосы к периферии и максимальна на поверхности полосы за счет деформаций

										Лист
										23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

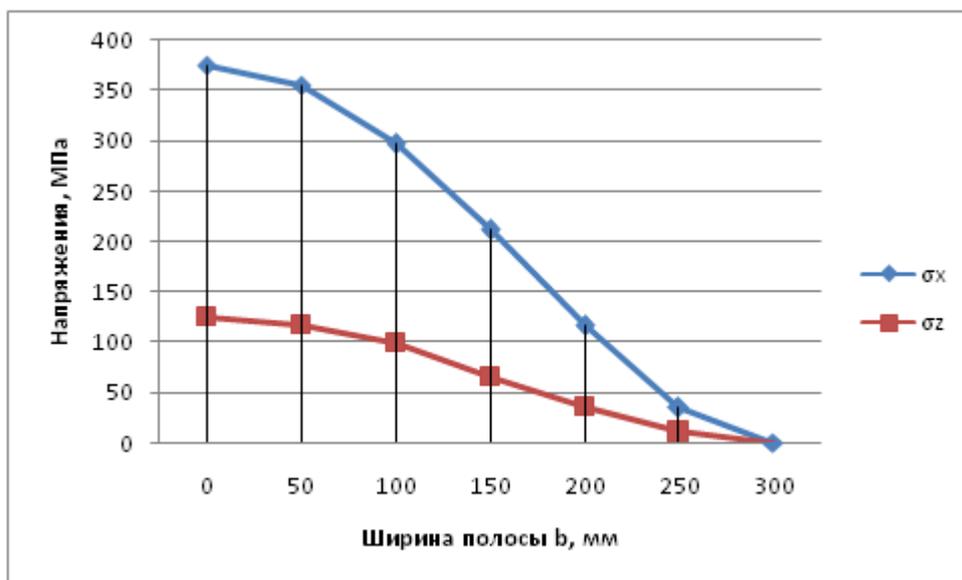


Рисунок 3.1.4 Распределение поперечных σ_x и продольных σ_z остаточных напряжений в листовых изделиях из циркониевого сплава Zr-2,5%Nb при $x=b/2$; $y=h/2$ (внешняя поверхность)

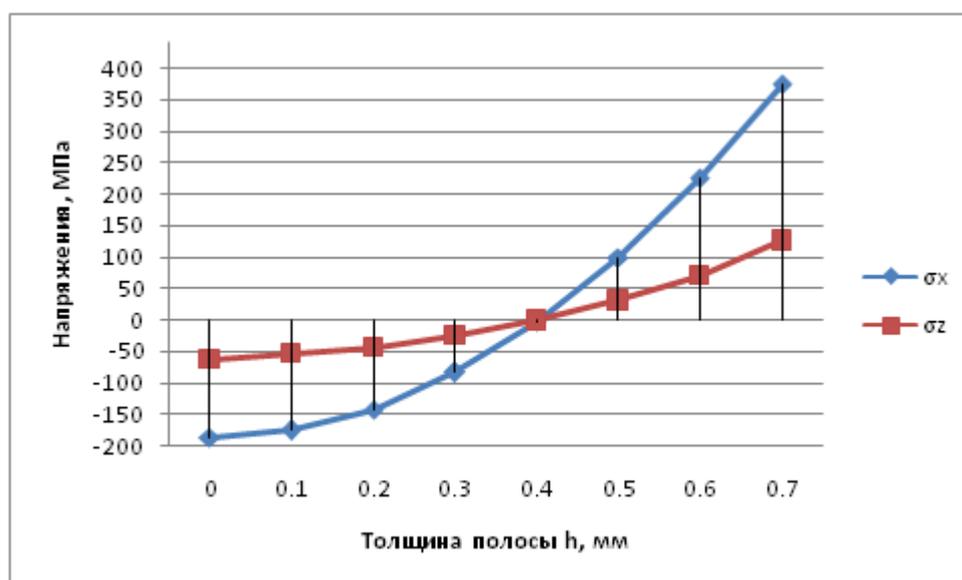


Рисунок 3.1.5 Распределение поперечных σ_x и продольных σ_z остаточных напряжений в листовых изделиях из циркониевого сплава Zr-2,5%Nb при $x=0$; $y=h/2$ (по толщине листа)

Определим остаточные напряжения при холодной прокатке листа, выполненного из материалов: ЭИ69, Х18Н9Т, Л-59 и дюралюминий, обладающих различными механическими характеристиками. В [12] представлены экспериментальные диаграммы растяжения сплавов ЭИ69, Х18Н9Т, Л-59 и дюралюминия, по которым можно определить эмпирические коэффициенты для описания сопротивления материала деформации.

На рисунке 3.2.1 представлены экспериментальные диаграммы растяжения материалов с наложенными линиями тренда в программной оболочке Excel.

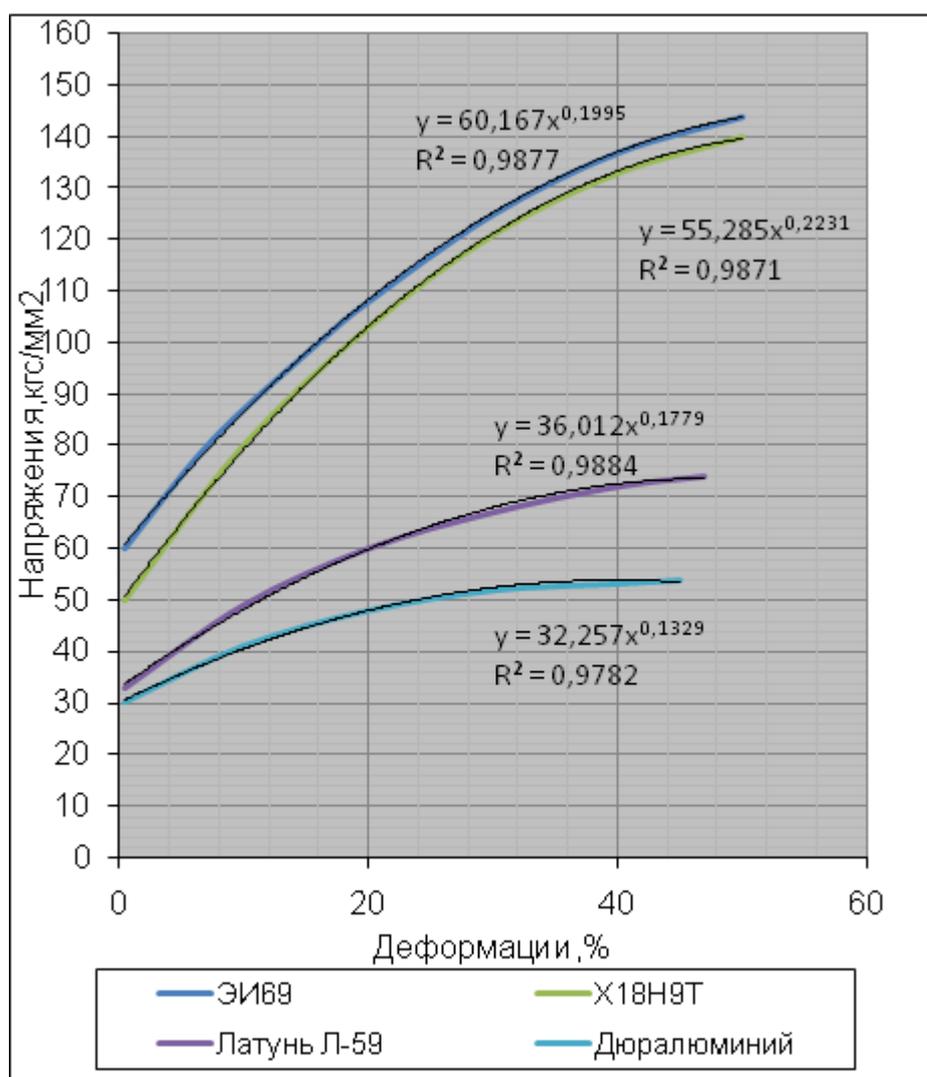


Рисунок 3.2.1 Экспериментальные диаграммы растяжения материалов с наложенными линиями тренда.

Из рисунка 3.2.1 видно:

Для сплава ЭИ69 эмпирические коэффициенты $m=60,167$ и $n=0,1995$. Достоверность составила 0,9877.

Для сплава Х18Н9Т эмпирические коэффициенты $m=55,285$ и $n=0,2231$. Достоверность составила 0,9871.

Для сплава Л59 эмпирические коэффициенты $m=36,012$ и $n=0,1779$. Достоверность составила 0,9884.

Для дюралюминия эмпирические коэффициенты $m=32,257$ и $n=0,1329$. Достоверность составила 0,9782.

Модуль упругости:

У сплава ЭИ69 – 21200 кг/мм²; У сплава Х18Н9Т – 19500 кг/мм²;

У сплава Л59 – 10500 кг/мм²; У дюралюминия – 7000 кг/мм².

Расчеты выполнялись для случая холодного проката полосы шириной 600 мм и толщиной 3 мм, радиус вала - 250 мм, величина обжатия – 1,2

В таблицах 1, 2, 3 представлены результаты расчета по определению технологических остаточных напряжений для разных сплавов.

Таблица 1

Технологические остаточные напряжения в срединной плоскости полосы

Напряжения (сплав)	Ширина полосы b, мм						
	0	50	100	150	200	250	300
σ_x (ЭИ69)	-319,0	-301,605	-252,117	-179,5	-98,4831	-29,7911	0
σ_z (ЭИ69)	-98,9	-93,51	-78,1545	-55,64	-30,5306	-9,23793	-0,004
σ_x (Х18Н9Т)	-286,0	-270,385	-226,02	-160,9	-88,289	-26,7074	0
σ_z (Х18Н9Т)	-88,67	-83,81	-70,0647	-49,88	-27,3703	-8,2817	-0,004
σ_x (Л-59)	-179,4	-169,653	-141,816	-100,91	-55,3969	-16,7576	0
σ_z (Л-59)	-55,63	-52,59	-43,9621	-31,29	-17,1735	-5,19636	-0,002
σ_x (Дюралю- миний)	-146,2	-138,192	-115,517	-82,23	-45,1238	-13,65	0

σ_z (Дюралю-миний)	-45,32	-42,83	-35,8095	-25,45	-13,9888	-4,23271	-0,002
---------------------------	--------	--------	----------	--------	----------	----------	--------

Таблица 2

Технологические остаточные напряжения на внешней поверхности полосы

Напряжения (сплав)	Ширина полосы b, мм						
	0	50	100	150	200	250	300
σ_x (ЭИ69)	638,170	603,209	504,233	358,970	196,966	59,5822	0
σ_z (ЭИ69)	197,855	187,015	156,327	111,286	61,0521	18,4464	-0,044
σ_x (X18H9T)	572,112	540,77	452,039	321,813	176,578	53,4148	0
σ_z (X18H9T)	177,374	167,657	140,145	99,7671	54,7325	16,5369	-0,039
σ_x (Л-59)	358,972	339,306	283,632	201,921	110,793	33,5151	0
σ_z (Л-59)	111,293	105,96	87,9343	62,5989	34,3419	10,3761	-0,025
σ_x (Дюралю-миний)	292,402	276,383	231,033	164,476	90,2476	27,2999	0
σ_z (Дюралю-миний)	90,6548	85,6881	71,6273	50,9901	27,9733	8,45192	-0,02

Таблица 3

Технологические остаточные напряжения по толщине полосы

Напряжения (сплав)	Толщина полосы h, мм					
	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
σ_x (ЭИ69)	-319,085	-280,795	-165,924	25,52682	293,5585	638,1706
σ_z (ЭИ69)	-98,914	-87,0447	-51,4362	7,913794	91,00914	197,8551
σ_x (X18H9T)	-286,056	-251,73	-148,749	22,8845	263,1718	572,1126
σ_z (X18H9T)	-88,6752	-78,0346	-46,112	7,094625	81,58865	177,3749
σ_x (Л-59)	-179,486	-157,948	-93,3328	14,35889	165,1272	358,9722
σ_z (Л-59)	-55,6393	-48,9628	-28,933	4,451525	51,19282	111,2939

σ_x (Дюралю- миний)	-146,201	-128,657	-76,0246	11,69609	134,505	292,4022
σ_z (Дюралю- миний)	-45,3212	-39,8829	-23,5675	3,626007	41,69932	90,65489

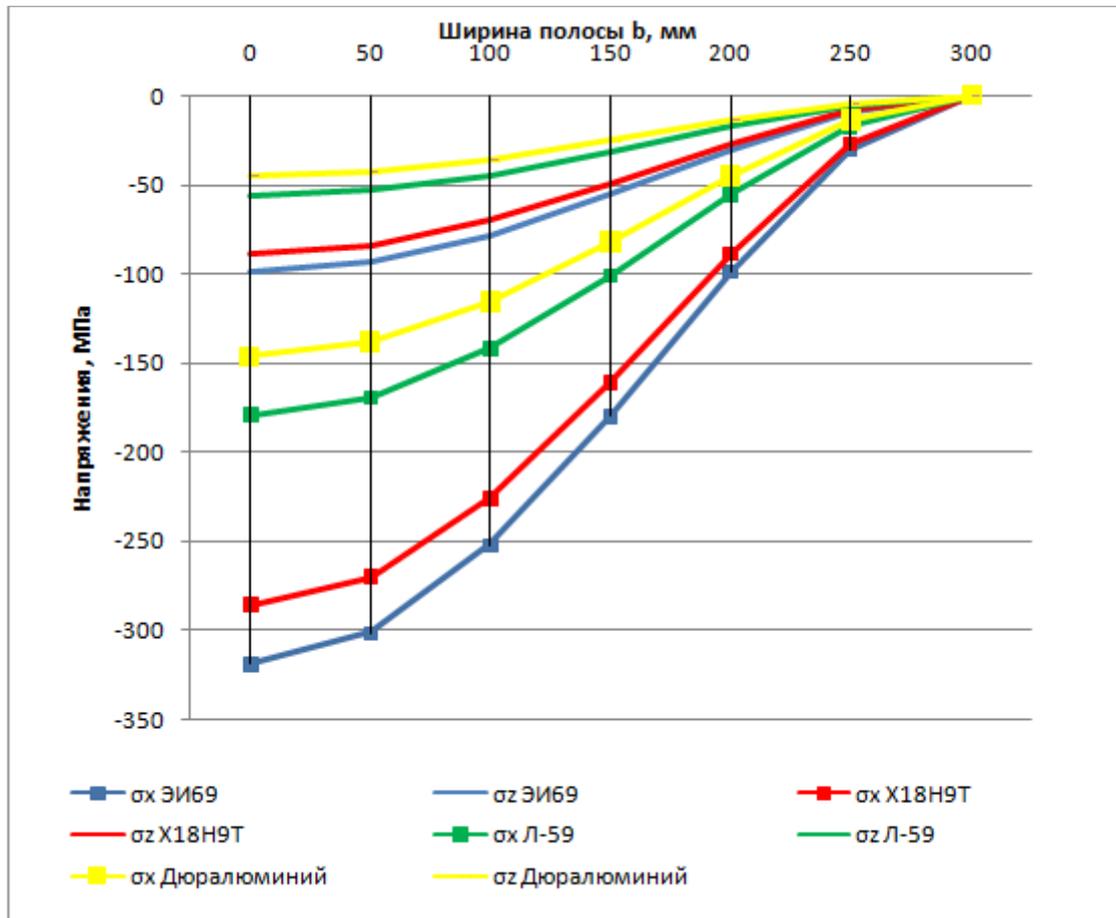


Рисунок 3.2.2 Распределение технологических остаточных напряжений в срединной плоскости холоднокатаной полосы для различных сплавов.

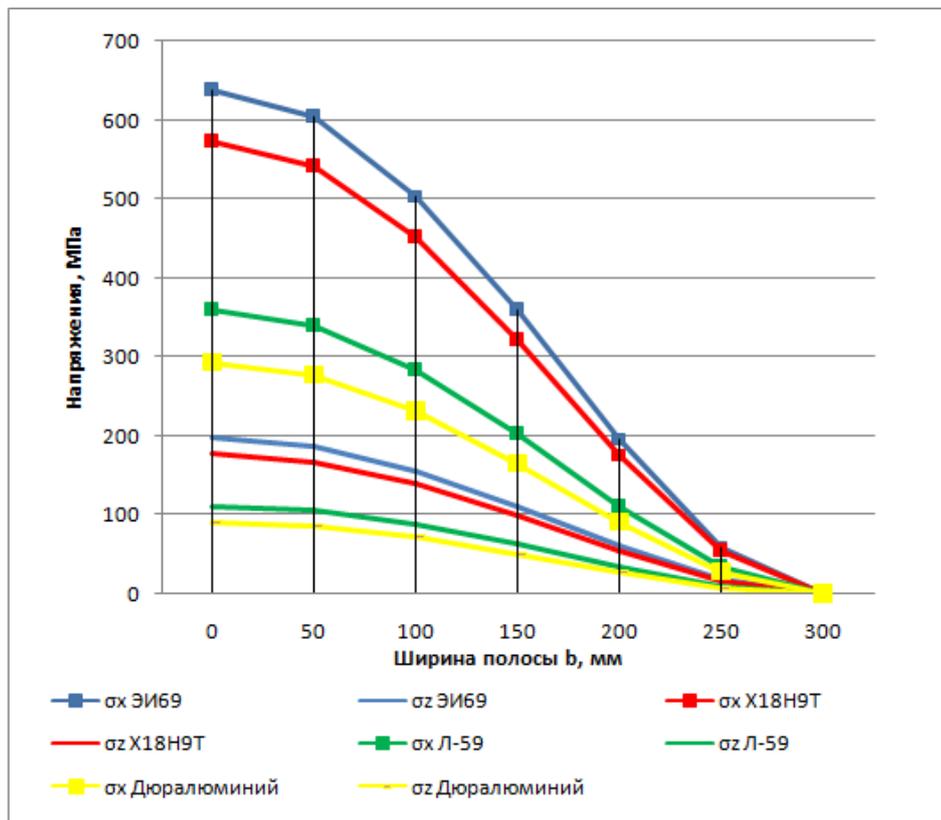


Рисунок 3.2.3 Распределение технологических остаточных напряжений на внешней поверхности холоднокатаной полосы для различных сплавов.

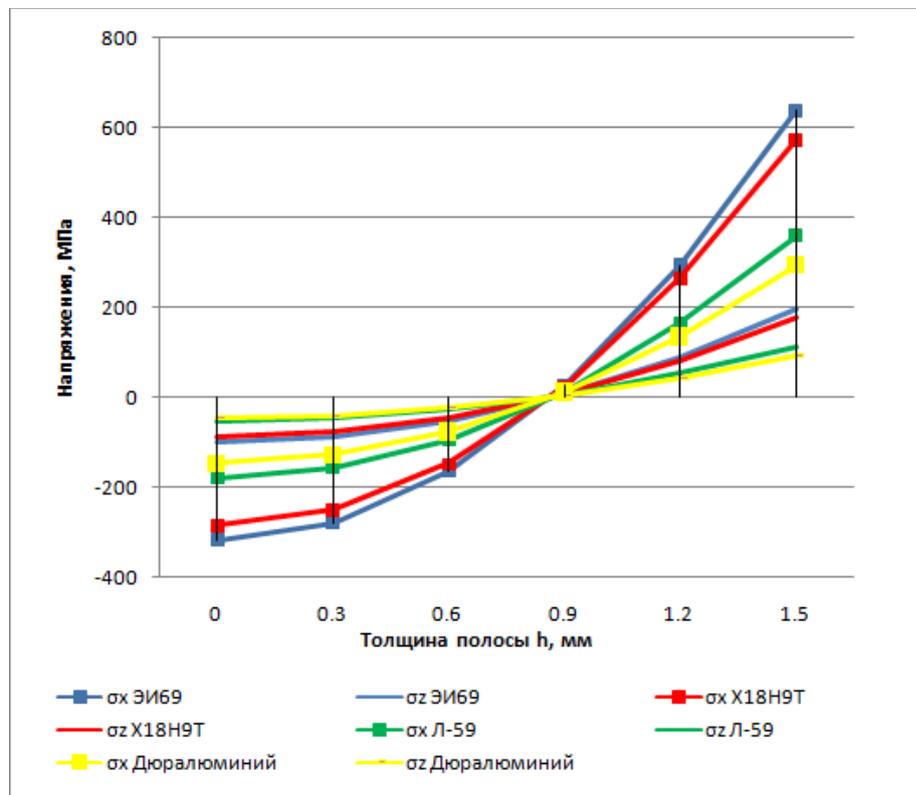


Рисунок 3.2.4 Распределение технологических остаточных напряжений по толщине холоднокатаной полосы для различных сплавов.

Анализ рисунков 3.2.2, 3.2.3 и 3.2.4 показал, что чем выше прочностные характеристики сплава, тем большие остаточные напряжения при обработке давлением в них возникают.

В качестве одного из технологических параметров холодной прокатки, влияющего на величину остаточных напряжений выбран – степень обжатия валками листа при одном проходе во время холодной прокатки. Расчет выполнялся для латуни Л-59, при радиусе вала 250 мм.

В таблицах 4, 5, 6 представлены результаты расчета по определению технологических остаточных напряжений для различной степени обжатия листов.

Таблица 4

Технологические остаточные напряжения в срединной плоскости полосы в зависимости от степени обжатия при прокатке

Напряжения (сплав)	Ширина полосы b, мм						
	0	50	100	150	200	250	300
Степень обжатия - 1,1							
σ_x (Л-59)	-124,9	-118,145	-98,7593	-70,3081	-38,5779	-11,6698	0
σ_z (Л-59)	-38,746	-36,624	-30,6147	-21,7953	-11,9595	-3,61869	-0,001
Степень обжатия - 1,2							
σ_x (Л-59)	-179,48	-169,653	-141,816	-100,961	-55,3969	-16,7576	0
σ_z (Л-59)	-55,639	-52,5912	-43,9621	-31,2975	-17,1735	-5,19636	-0,002
Степень обжатия - 1,3							
σ_x (Л-59)	-220,42	-208,346	-174,16	-123,987	-68,0313	-20,5795	0
σ_z (Л-59)	-68,329	-64,5856	-53,9885	-38,4355	-21,0903	-6,38148	-0,002

Таблица 5

Технологические остаточные напряжения на внешней поверхности полосы в зависимости от степени обжатия при прокатке

Напряжения (сплав)	Ширина полосы b , мм						
	0	50	100	150	200	250	300
Степень обжатия - 1,1							
σ_x (Л-59)	249,984	236,289	197,518	140,616	77,1557	23,3396	0
σ_z (Л-59)	77,5039	73,2577	61,2365	43,5932	23,9153	7,22583	-0,01
Степень обжатия - 1,2							
σ_x (Л-59)	358,72	339,306	283,632	201,921	110,793	33,5151	0
σ_z (Л-59)	111,293	105,196	87,9343	62,5989	34,3419	10,3761	-0,02
Степень обжатия - 1,3							
σ_x (Л-59)	440,842	416,691	348,32	247,973	136,062	41,1589	0
σ_z (Л-59)	136,676	129,188	107,989	76,8757	42,1742	12,7426	-0,03

Таблица 6

Технологические остаточные напряжения по толщине полосы в зависимости от степени обжатия при прокатке

Напряжения (сплав)	Толщина полосы h , мм					
	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
Степень обжатия - 1,1						
σ_x (Л-59)	-124,992	-109,993	-64,996	9,999381	114,9929	249,9845
σ_z (Л-59)	-38,7466	-34,0972	-20,1486	3,099996	35,65015	77,50392
Степень обжатия - 1,2						
σ_x (Л-59)	-179,486	-157,948	-93,3328	14,35889	165,1272	358,9722
σ_z (Л-59)	-55,6393	-48,9628	-28,933	4,451525	51,19282	111,2939
Степень обжатия - 1,3						
σ_x (Л-59)	-220,421	-193,971	-114,619	17,6337	202,7876	440,8425
σ_z (Л-59)	-68,3289	-60,1297	-35,5317	5,466778	62,8683	136,6766

Из графиков, изображенных на рисунках 3.2.5 и 3.2.6 видно, что с увеличением степени обжатия при прокатке величина технологических остаточных напряжений возрастает.

В качестве второго технологического параметра прокатки для исследования выбран радиус валка. В этом случае расчеты выполнялись для латуни Л-59 при степени обжатия 1,3.

Результаты расчетов представлены в таблицах 7, 8, 9.

Таблица 7

Технологические остаточные напряжения в срединной плоскости полосы при прокатке валками разного радиуса

Напряжения (сплав)	Ширина полосы b , мм						
	0	50	100	150	200	250	300
Радиус валка – 250 мм							
σ_x (Л-59)	-220,4	-208,346	-174,16	-123,987	-68,0313	-20,5795	0
σ_z (Л-59)	-68,32	-64,5856	-53,9885	-38,4355	-21,0903	-6,38148	0
Радиус валка – 300 мм							
σ_x (Л-59)	-219,54	-207,545	-173,49	-123,51	-67,7697	-20,5003	0
σ_z (Л-59)	-68,06	-64,3373	-53,7809	-38,2877	-21,0092	-6,35694	0
Радиус валка – 350 мм							
σ_x (Л-59)	-218,9	-206,921	-172,969	-123,139	-67,5659	-20,4387	0
σ_z (Л-59)	-67,86	-64,439	-53,6192	-38,1726	-20,946	-6,33783	0

Таблица 8

Технологические остаточные напряжения на внешней поверхности полосы
при прокатке валками разного радиуса

Напряжения (сплав)	Ширина полосы b , мм						
	0	50	100	150	200	250	300
Радиус валка – 250 мм							
σ_x (Л-59)	440,842	416,691	348,32	247,973	136,062	41,1589	0
σ_z (Л-59)	136,676	129,188	107,89	76,8757	42,1742	12,7426	-0,03
Радиус валка – 300 мм							
σ_x (Л-59)	439,147	415,089	346,980	247,020	135,539	41,0006	0
σ_z (Л-59)	136,151	128,691	107,574	76,5801	42,0120	12,6936	-0,03
Радиус валка – 350 мм							
σ_x (Л-59)	437,827	413,841	345,937	246,277	135,131	40,8773	0
σ_z (Л-59)	135,741	128,304	107,250	76,3499	41,8857	12,6554	-0,03

Таблица 9

Технологические остаточные напряжения по толщине полосы в зависимости
при прокатке валками разного радиуса

Напряжения (сплав)	Толщина полосы h , мм					
	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
Радиус валка – 250 мм						
σ_x (Л-59)	-220,421	-193,971	-114,619	17,6337	202,7876	440,8425
σ_z (Л-59)	-68,3289	-60,1297	-35,5317	5,466778	62,8683	136,6766
Радиус валка – 300 мм						
σ_x (Л-59)	-219,574	-193,225	-114,178	17,5659	202,0078	439,1474
σ_z (Л-59)	-68,0661	-59,8985	-35,3951	5,445757	62,62656	136,151
Радиус валка – 350 мм						
σ_x (Л-59)	-218,914	-192,644	-113,835	17,51309	201,4005	437,8272
σ_z (Л-59)	-67,8615	-59,7184	-35,2887	5,429386	62,43829	135,7417

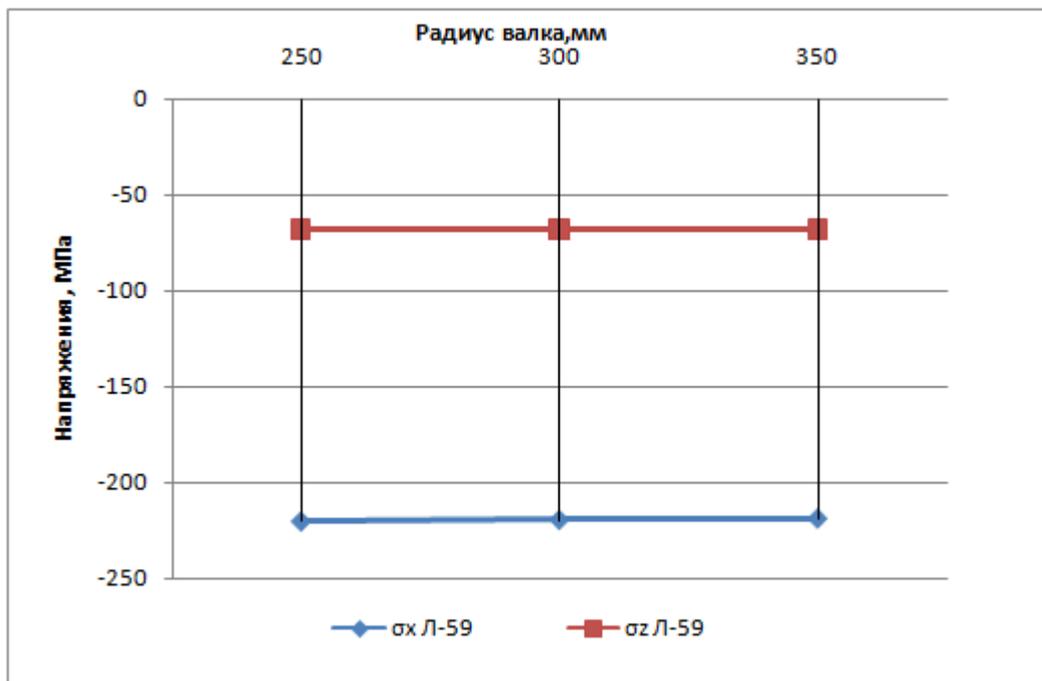


Рисунок 3.2.7 Распределение максимальных технологических остаточных напряжений в срединной плоскости полосы в зависимости от радиуса вала.

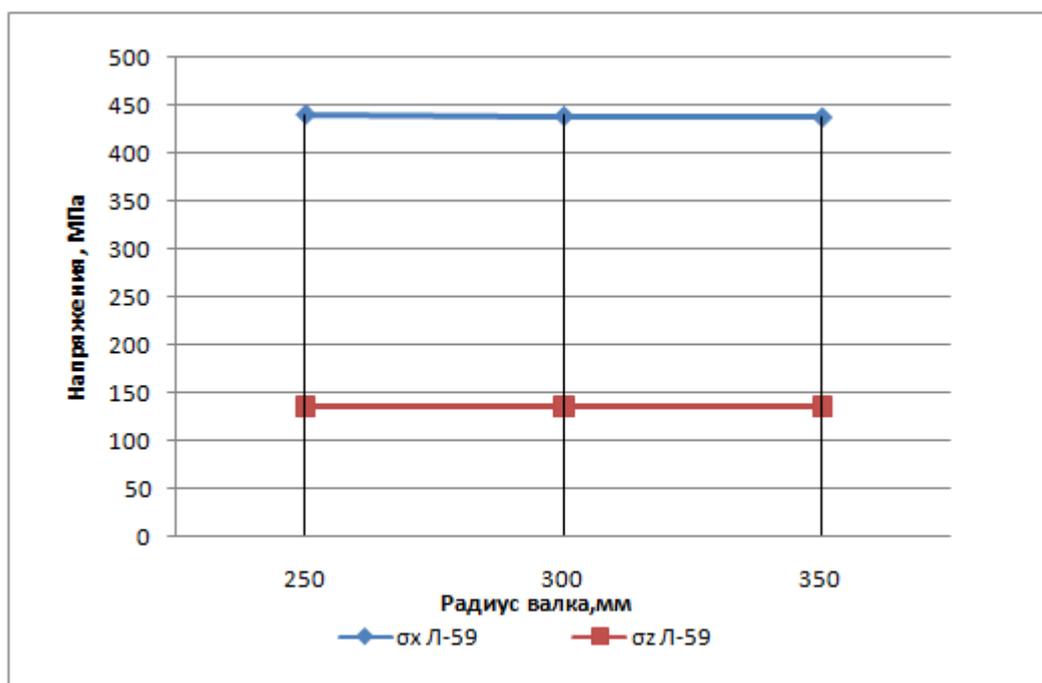


Рисунок 3.2.8 Распределение максимальных технологических остаточных напряжений на внешней поверхности полосы в зависимости от радиуса вала.

Как видно из графиков, изображенных на рисунках 3.2.7 и 3.2.8, радиус вала оказывает незначительное влияние на величину максимальных остаточных напряжений.

Рассмотрим влияние толщины обрабатываемой холодной прокаткой пластины на величину остаточных напряжений. Расчет выполнялся для латуни Л-59, радиус вала 300 мм.

Результаты расчета представлены в таблицах

Таблица 10

Технологические остаточные напряжения в срединной плоскости при прокатке полосы разной толщины

Напряжения (сплав)	Ширина полосы b, мм						
	0	50	100	150	200	250	300
Толщина пластины h=1,4 мм							
σ_x (Л-59)	-216,75	-204,875	-171,259	-121,922	-66,898	-20,2367	0
σ_z (Л-59)	-67,192	-63,511	-53,09	-37,7956	-20,7385	-6,27376	0
Толщина пластины h=2,2 мм							
σ_x (Л-59)	-218,29	-206,338	-172,481	-122,792	-67,3755	-20,3811	0
σ_z (Л-59)	-67,671	-63,9638	-53,4686	-38,0653	-20,8867	-6,31913	0
Толщина пластины h=3,0 мм							
σ_x (Л-59)	-219,57	-207,545	-173,49	-123,51	-67,7697	-20,5003	0
σ_z (Л-59)	-68,066	-64,3373	-53,7809	-38,2877	-21,0092	-6,35694	0

Технологические остаточные напряжения на внешней поверхности при
прокатке полосы разной толщины

Напряжения (сплав)	Ширина полосы b , мм						
	0	50	100	150	200	250	300
Толщина пластины $h=1,4$ мм							
σ_x (Л-59)	433,499	409,750	342,517	243,843	133,796	40,4733	0
σ_z (Л-59)	134,388	127,025	106,182	75,5922	41,4756	12,5431	0
Толщина пластины $h=2,2$ мм							
σ_x (Л-59)	436,593	412,675	344,962	245,583	134,751	40,7622	0
σ_z (Л-59)	135,352	127,936	106,943	76,1330	41,7701	12,6274	0
Толщина пластины $h=3,0$ мм							
σ_x (Л-59)	439,147	415,089	346,980	247,020	135,539	41,0006	0
σ_z (Л-59)	136,151	128,691	107,574	76,5801	42,0120	12,6936	0

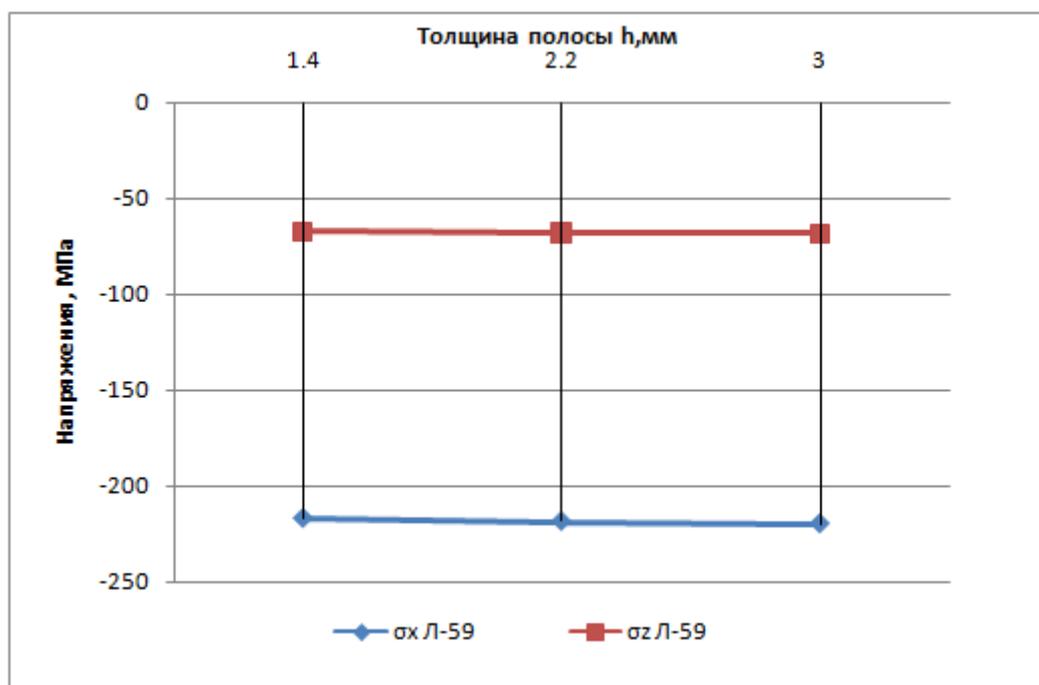


Рисунок 3.2.9 Распределение максимальных технологических остаточных напряжений на срединной плоскости полосы в зависимости от ее толщины.

5 Методы управления напряжениями и качеством

Метод устранения остаточных напряжений термической обработкой наиболее широко распространен. Сущность его заключается в том, что при высоких температурах нагрева энергия атомов повышается, вследствие чего устраняются искажения решетки, а вместе и с ними макро- и микронапряжения.

Целью термической обработки – одной из завершающих технологических операций при производстве металлопродукции методом холодного деформирования – является не только снижение и устранение остаточных напряжений, но и придание металлопродукции требуемых стандартами или техническими условиями прочности, пластичности, твердости и других свойств.

Остаточные напряжения и эксплуатационные свойства готовой продукции связаны, потому, регулируя уровень остаточных напряжений, можно улучшить ее качество. Практически считается, что для большинства металлов и сплавов остаточные напряжения снимаются при температурах нагрева до 600С, однако полное снятие остаточных напряжений происходит только при температуре рекристаллизации [6].

					<i>ВКР.2020-ИЧ.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		48

6 Заключение

Выпускная квалификационная работа посвящена актуальной проблеме образования технологических остаточных напряжений в процессе обработки металлов давлением, а именно холодной листовой прокатке. В ходе выполнения работы была изучена литература по данной тематике, подробно рассмотрен процесс холодной листовой прокатки, причины возникновения технологических остаточных напряжений, существующие методы определения остаточных напряжений. Для проведения исследований определена и рассмотрена методика вычислений технологических остаточных напряжений, применяемая для процесса холодной листовой прокатки. Выполнена верификация данной методики. Выявлены основные технологические параметры холодной листовой прокатки, оказывающие влияние на величину и характер распределения остаточных напряжений в листах. Выполнен комплекс расчетов, который позволил установить влияние основных технологических параметров холодной прокатки (радиус валков, величина обжатия за один проход, толщина листа и механические свойства заготовки) на величину и характер распределения остаточных напряжений в листах после прокатки. Вычислительные эксперименты показали, что существенное влияние на величину остаточных напряжений оказывают механические свойства обрабатываемого металла и величина обжатия обрабатываемой полосы за один проход, в то время, как толщина полосы и радиус валков практически не влияют на распределение остаточных напряжений. Также в работе описано какое влияние технологические остаточные напряжения оказывают на качество готовой металлопродукции и каким образом можно управлять соответствующими напряжениями.

Таким образом, поставленные в рамках выпускной квалификационной работы задачи были выполнены и цель работы достигнута.

					<i>ВКР.2020-3.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		49

