

# ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ КАЛИБРОВ НА ПОВЕДЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ

## INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE GROOVES ON THE BEHAVIOR OF INTERNAL MATERIALS DISCONTINUITIES DURING ROLLING

Камила Собчак, аспирантка

Хенрик Дыя, проф., д.т.н.

Ченстоховский Технологический Университет, Факультет инженерии процессов, материалов и прикладной физики, кафедра обработки металлов давлением и инженерии безопасности  
ал. Армии Краевой 19, 42-200 Ченстохова, Польша;  
e-mail: ksobczak@wip.pcz.pl

### Abstract

*В статье рассмотрены вопросы влияния процесса прокатки на схлопывание внутренних дефектов непрерывных отливок в процессе прокатки. Исследовано влияние формы начальных режуще-растягивающих калибров на схлопывание дефектов. Для сравнения была проведена прокатка в классических калибрах. Выполнены математическое моделирование и опытные исследования процесса прокатки плоских прутков для садки с нанесенными дефектами, имитирующими внутренние дефекты материала. Экспериментальные исследования были проведены на лабораторном прокатном стане D150. Математическое моделирование было проведено в компьютерной программе Forge 2008®. Для исследований использовали конструкционную сталь S355J2G2 и чистый свинец. Проанализировано распределение температуры, интенсивности деформации и напряжений в поперечном сечении полосы, находящегося в поочередных калибрах. Исследовано изменение формы поверхностных дефектов и их размеров после прокатки.*

*В процессе опытных исследований на стальных образцах после прокатки к третьей клетки дефекты схлопывались в среднем на 99,6%, а в свинцовых образцах после прокатки в первой клетки дефекты схлопывались в среднем на 82%, во второй – 98%, а в третьей – 100%. Во время математического моделирования прокатки стальных образцов, схлопывание составляло в первой клетки в среднем 80%, во второй – 97%, в третьей – 99%.*

*В работе установлено, что на скорость схлопывания дефектов садки очень большое влияние имеет форма прокатного калибра.*

### 1. Введение

Проблемы связанные с устранением дефектов в деформируемом материале являются предметом исследований, проводимых в Ченстоховском политехническом университете на Институте обработки металлов давлением и инженерии безопасности [1÷3]. На основании этих исследований были сделаны выводы о том, что на интенсивность схлопывания металлургических дефектов непрерывнолитых слитков в процессе прокатки существенное влияние оказывают такие технологические параметры процесса, как: обжатие, температура деформируемой полосы, форма и последовательность применяемых калибров, а также расположение дефектов [1÷6]. Настолько же важным является такое проведение процесса прокатки слитка, чтобы как можно скорее происходило залечивания дефектов. Быстрое их схлопывание дает большие шансы полного схлопывания дефектов. Наиболее эффективными с этой точки зрения являются те процессы прокатки, которые облегчают быструю стыковку противоположных поверхностей дефектов, что происходит в результате совместного действия вертикальной сжимающей и горизонтальной растягивающей составляющей нормального напряжения. После схлопывания дефектов важным является применение таких калибров в валках и параметров процесса, которые недопустили бы повторного их открытия [5].

### 2. Цель и область работы

Главной целью обработки металлов давлением является получение требуемой геометрии и соответствующего качества готовых изделий. Дефекты в садке могут сохраняться до конца процесса прокатки и часто приводят к ухудшению прочностных и пластических свойств горячекатаных изделий. Проблема получения заданного качества садки стала основой исследований над поведением внутренних дефектов в процессе деформации. Также повлияла на разработку нового способа прокатки плоских прутков с насильным уширением в калибрах разной формы.

Был разработан процесс прокатки плоских прутков 200 x 20 [мм x мм] из садки с сечением 160 x 160 [мм x мм] в десять проходов. Первые три формы калибров были запроектированы таким образом, чтобы в них происходило схлопывание внутренних дефектов при прокатке. В статье было проанализировано первые три клетки, т.к. они имеют наибольшее влияние на залечивание дефектов [4,7]. На рисунке 1 представлены формы этих калибров.

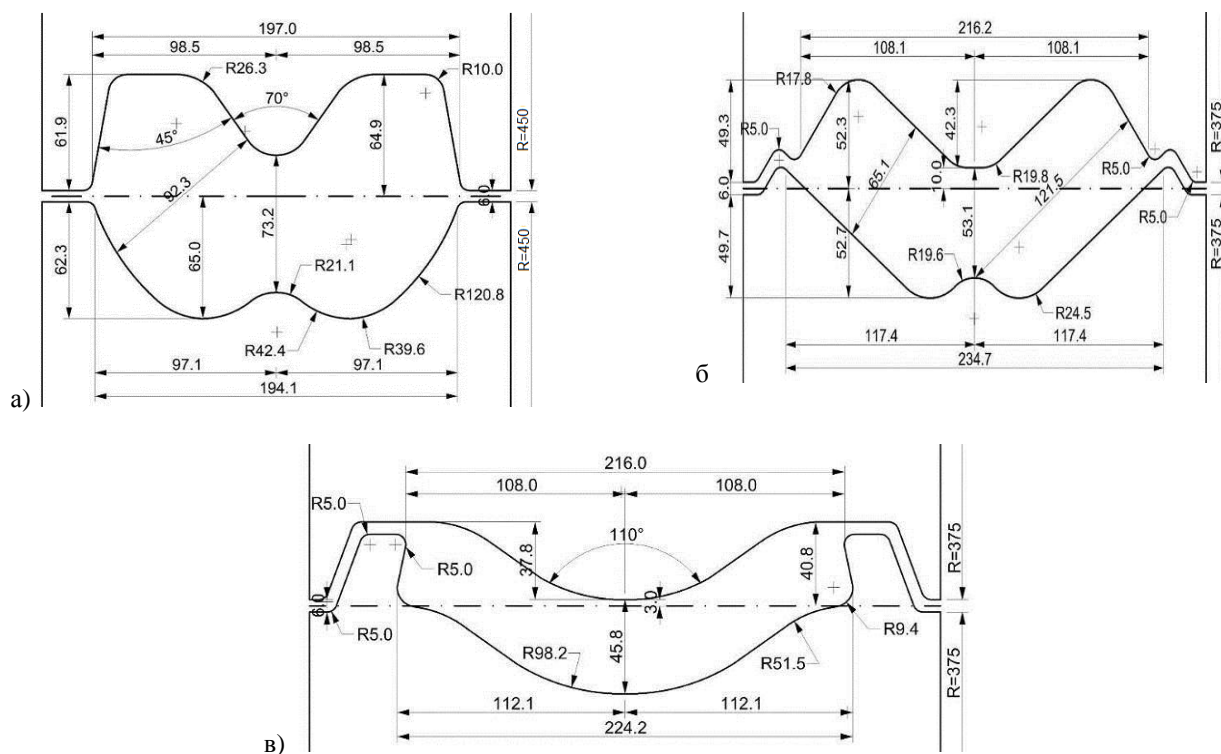


Рис.1. Новые калибры для прокатки плоских прутков из садки 160 x 160 [мм x мм]:  
а) протягивающий калибр; б, в) уширяющие калибры

В качестве материала применяли конструкционную сталь S355J2G3. В образцах были проделаны отверстия таким образом, чтобы они имитировали реальные дефекты материала. Было запроектировано пять разных видов дефектов: усадочная раковина, осевая усадка,

внутренние и подповерхностные поры и т.н. каналы. На рисунке 2 представлен вид реальной отливки с внутренними дефектами (рис. 2а), запроектированного образца (рис. 2б), а также стального (рис. 2в) и свинцового (рис. 2д) образцов для экспериментальных исследований.

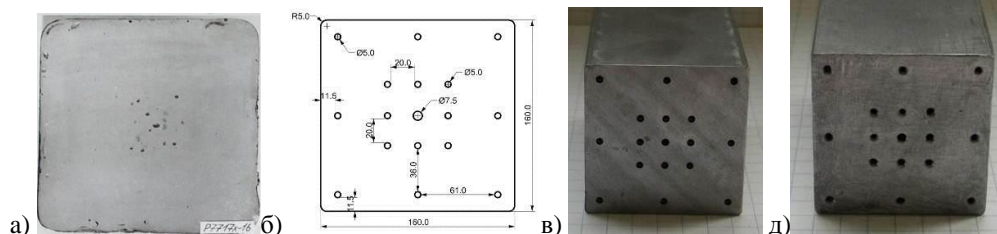


Рис. 2. Вид образца с нанесенными дефектами, сравненные с реальными дефектами непрерывнолитой заготовки. Внутренние и подповерхностные поры отливки:  
а) реальные [8]; б) запроектированные; в) выполненные в стальном образце; д) выполненные на свинцовом образце

Для компьютерного моделирования процесса прокатки плоских прутков, проведенного в программе Forge 2008®, приняты следующие условия прокатки: температура начала прокатки 1150°C, температура валков 60°C, коэффициент трения  $\mu = 0,8$ , фактор трения  $m = 0,85$ , коэффициент теплообмена между материалом и инструментом  $\alpha = 3000$  [Вт/Км<sup>2</sup>], коэффициент теплообмена между материалом и окружающей средой  $\alpha_{\text{пов}} = 100$  [Вт/Км<sup>2</sup>].

### 3. Результаты математического моделирования

На основании проведенного математического моделирования в программе Forge 2008®, получено распределение температуры в

поперечном сечении каждой полосы после прокатки в трех калибрах. Был проведен анализ распределения интенсивности напряжений  $\sigma_i$ , а также средних напряжений  $\sigma_m$  и интенсивности деформации  $\varepsilon_i$  в процессе прокатки плоских прутков из исследуемой стали в трех первых калибрах. Математическое моделирование для сравнения было проведено и для процесса прокатки в традиционных калибрах. Калибровка была запроектирована таким образом, чтобы конечная геометрия прокатанного материала была одинакова. В таблице 1 представлены основные параметры процесса прокатки в традиционных и новых калибрах.

Таблица 1

Основные параметры процесса прокатки плоских прутков 200х20  
[мм х мм] в традиционных и новых калибрах

№ прохода	Традиционные калибры						Новые калибры					
	Абсолютное обжатие $\Delta h$	Относительное обжатие $\varepsilon$	Коэффициент обжатия $\gamma$	Абсолютное расширение $\Delta b$	Скорость полосы на выходе из клетки $v$ , [м/с]	Время перерыва $\tau_p$ , [с]	Абсолютное обжатие $\Delta h$	Относительное обжатие $\varepsilon$	Коэффициент обжатия $\gamma$	Абсолютное расширение $\Delta b$	Скорость полосы на выходе из клетки $v$ , [м/с]	Время перерыва $\tau_p$ , [с]
1	25,5	0,16	0,84	11,6	0,31	8,6	56,2	0,35	0,46	29,4	0,56	5,7
2	32,7	0,24	0,73	17,2	0,32	8,3	19,7	0,27	0,73	22,9	0,67	3,9
3	10,7	0,06	0,94	1,4	0,38	8,3	7,8	0,15	0,85	11,1	0,97	5,2
4	17,8	0,17	0,83	9,0	0,41	3,3	15,8	0,34	0,65	25,5	1,04	4,1
5	15,3	0,18	0,82	5,6	0,43	3,3	40,9	0,31	0,84	5,4	1,23	2,3
6	3,5	0,02	0,98	1,8	0,64	5,0	11,2	0,32	0,68	7,0	1,24	2,3
7	25,8	0,36	0,64	13,6	0,97	4,8	10,5	0,05	0,95	2,8	1,27	4,7
8	15,9	0,35	0,65	8,4	0,99	6,8	5,3	0,19	0,81	4,1	1,42	4,2
9	3,2	0,02	0,98	1,6	1,23	2,3	8,6	0,04	0,96	2,9	1,51	4,2
10	7,6	0,24	0,76	2,6	1,24	2,3	4,4	0,18	0,82	0,6	6,11	-
11	6,8	0,03	0,97	1,6	1,27	4,7	-	-	-	-	-	-
12	4,14	0,16	0,84	6,8	1,42	4,2	-	-	-	-	-	-
13	8,7	0,04	0,94	2,9	1,44	4,2	-	-	-	-	-	-
14	4,4	0,18	0,82	0,6	1,52	-	-	-	-	-	-	-

Из данных, представленных в таблице 1 следует, что в процессе прокатки с использованием протягивающе-расширяющих калибров не использовали четырех клеток, благодаря чему была увеличена производительность стана за счет сокращения времени прокатки. Применение таких калибров позволило проводить прокатку с большим относительным единичным обжатием и с большими коэффициентами удлинения на начальных этапах процесса, что было невозможным в традиционных калибрах из-за образования выпуклости и трещин, а также из-за для двух процессов.

проблем с введением садки в калибр. Благодаря новым калибрам, примененных на начальном этапе процесса, было применено меньше осадочных калибров, которые могли бы привести к раскрытию только что залеченного дефекта. Первый осадочный калибр был применен аж в пятом проходе [6].

Далее были проанализированы распределение температуры в полосе при прокатки и после окончания процесса в поперечном сечении (рис. 3). На рисунке 3 представлено три первые калибра

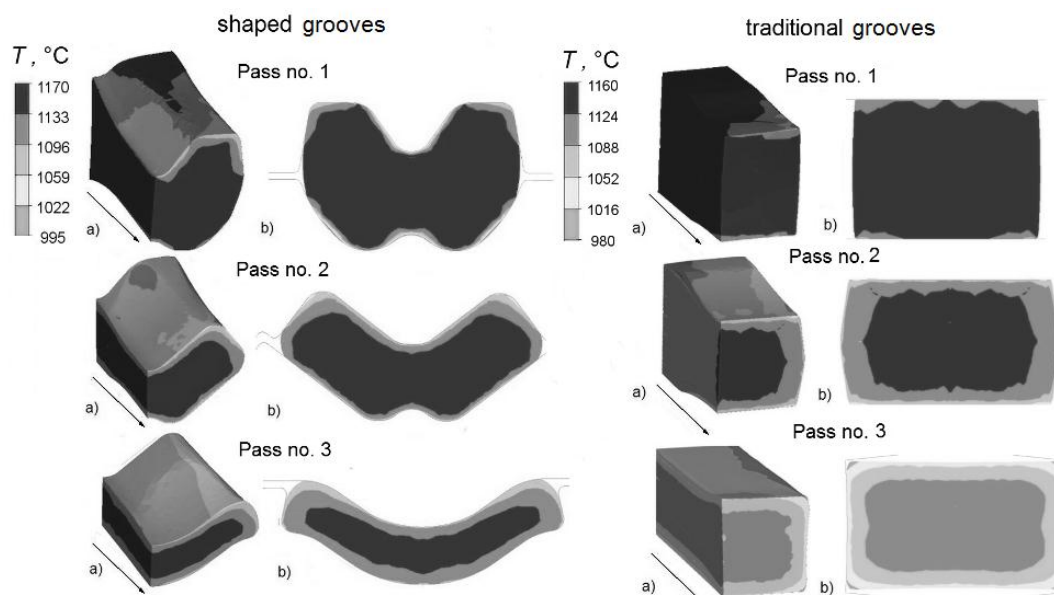


Рис. 3. Распределение температуры в поперечном и продольном сечении полосы,  $T$  [°C] прокатанной в новых и традиционных калибрах:  
 а) продольное сечение в очаге деформации (1/2 полосы);  
 б) поперечное сечение при выходе из очага деформации (целая полоса)

Из данных, представленных на рисунке 3 видно, что средние значения температур полосы в новых калибрах на  $50^{\circ}\text{C}$  выше, чем в традиционных. Благодаря форме первых трех калибров в центральной части полосы дольше сохраняется высокая температура (ок.  $1170^{\circ}\text{C}$ ), что приводит к более эффективному схлопыванию внутренних дефектов по сравнению с прокаткой в традиционных калибрах.

В работе был проведен анализ распределения интенсивности деформации  $\epsilon_i$  и напряжений  $\sigma_i$ , из которого следует, что форма калибров привел к росту этих значений, что также благоприятно отразилось на заживлении внутренних дефектов по сравнению с традиционной прокаткой.

Был проведен анализ распределения средних напряжений  $\sigma_m$  в процессе прокатки плоских прутков в новых калибрах. На рисунке 4 представлено распределение средних напряжений  $\sigma_m$  в поперечном сечении полосы (рис. 4а) и в области дефектов (рис. 4б) в трех новых калибрах на опытном образце с внутренними и подповерхностными дефектами (садка 4). В обозначенных местах были проведены измерения средних напряжений. На рисунке 5 представлены средние значения напряжений в местах появления дефектов и в местах, где их не обнаружено, но они могли бы появиться. Положительные значения указывают на средние напряжения  $\sigma_m$ , которые провоцируют схлопывание дефектов, а отрицательные – затрудненного их заживление.

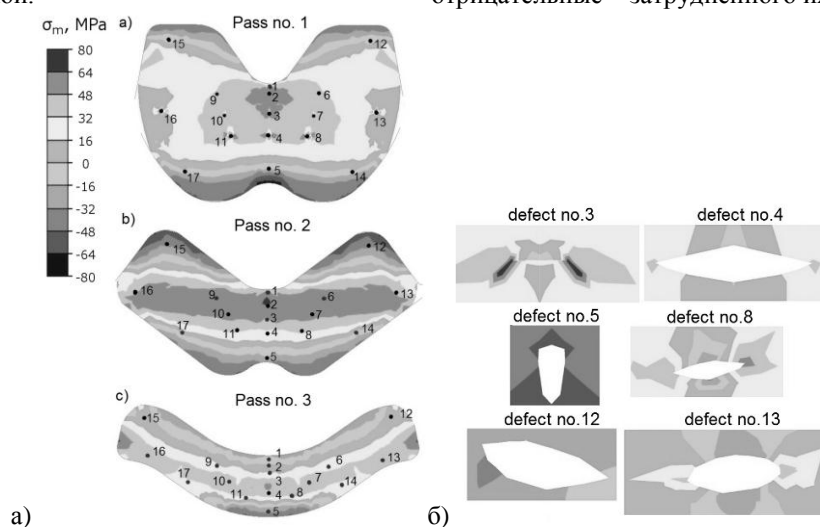


Рис. 4. Распределение средних напряжений  $\sigma_m$ : а) в поперечном сечении полос, прокатанных в трех в новых калибрах; б) в области примерных незалеченных дефектов в полосе после первого нового калибра. Примерный образец с внутренними и подповерхностными порами (садка 4)

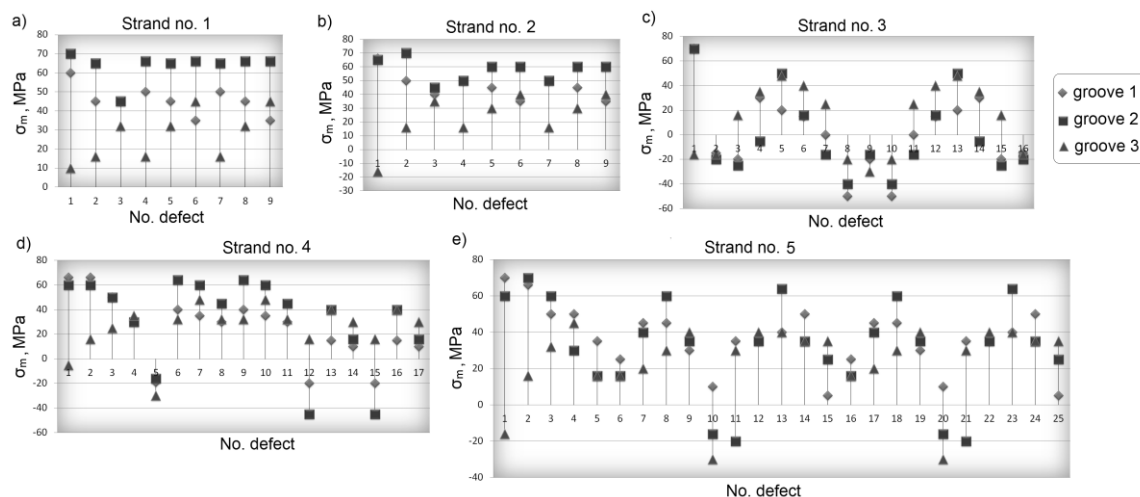


Рис.5. Изменение среднего напряжения  $\sigma_m$  в местах конкретных дефектов после каждого прохода в пяти разных садках с дефектами

Из данных, представленных на рисунках 4 и 5, следует, что появление высоких значений средних напряжений порядка 70 МПа в дефектных местах привело к их залечиванию, например, дефекты 3, 4, 8 и 13 – садка 4 и дефекты 9, 12 и 13 – садка 5 (рис. 5). Такие напряжения влияют на схлопывание некоторых дефектов уже в первом калибре. Средние напряжения порядка 45 МПа привели к схлопыванию дефектов если не в первом, то во втором калибре. Однако появление в определенной области средних напряжений  $\sigma_m$  порядка -20 МПа либо напряжений меньших 20 МПа приводит к тому, что схлопывание такого дефекта затруднено.

Из литературы [8, 9] следует, что в центре отливки обычно находятся большие по объему поры. Поэтому для устранения таких дефектов необходимо спровоцировать появление больших средних напряжений в центре полосы, что при

прокатке в традиционных калибрах является затруднительным, но возможным при прокатке в новых калибрах.

Следующим этапом исследований было измерение площади поверхности дефектов при математическом моделировании. Использование программы типа CAD дало возможность определение площади в конкретной области очага деформации. На рисунке 6 представлены поперечные сечения полос и изменение площади дефектов в трех местах очага деформации (на входе, в центре и на выходе), полученные при математическом моделировании процесса прокатки плоских прутков. Представлено три прохода процесса прокатки для одной из пяти садок. На рисунке 7 представлено изменение площади поверхности дефектов и относительное изменение площади дефектов в пяти садках с внутренними дефектами.

Садка 4 (внутренние и подповерхностные поры)			
№ прохода	I – при входе в очаг деформации	II – в центре очага деформации	III – на выходе из очага деформации
11			
22			
33			

Рис. 6. Изменение величины дефектов в новых калибрах садки 4 прокатаной в каждом калибре: I – при входе в очаг деформации, II – в центре очага деформации, III – при выходе из очага деформации

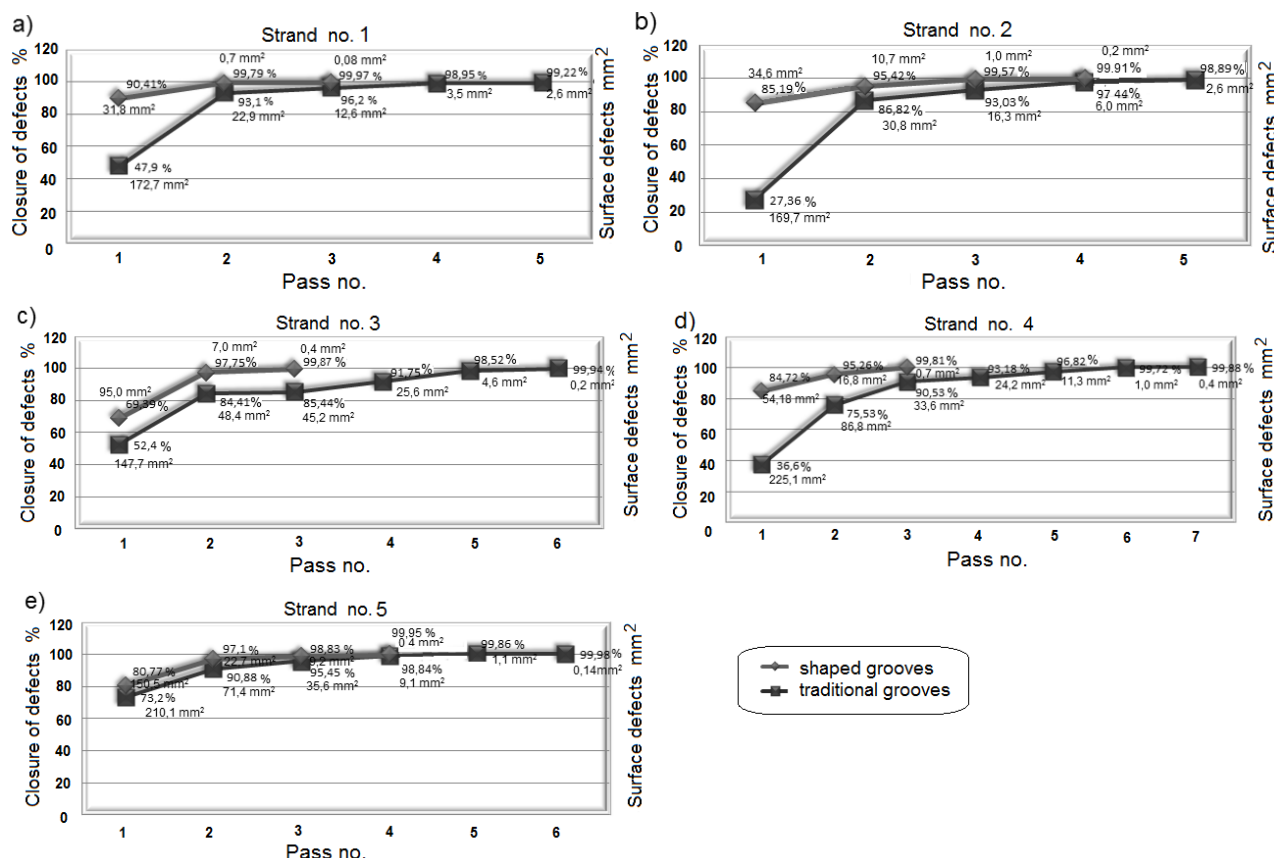


Рис. 7. Изменение площади дефекта и относительное изменение площади дефектов садки в процессе прокатки в каждом проходе: а) усадочная раковина; б) дефекты усадки; в) подповерхностные дефекты; г) внутренние и подповерхностные поры; д) дефекты в виде каналов

Из данных, представленных на рисунках 6 и 7 следует, что дефекты в процессе прокатки в новых калибрах эффективнее залечивались по сравнению с прокаткой в классических калибрах. В большинстве случаев в процессе прокатки в новых калибрах полное залечивание внутренних дефектов наблюдалось уже в третьей клетке (садка номер 1, 3, 4), а при прокатке в традиционных калибрах только в шестом или седьмом проходе.

В новых калибрах в среднем во всех садках дефекты схлопывались в первом калибре на 82%, во втором – 97%, третьем – 99,6% случаев, а четвертом на 100%. В традиционных калибрах дефекты схлопывались в первом калибре на 48%, втором – 86%, третьем 92%, четвертом – 96%, в пятом – 98%, а на 100% только в шестом калибре. Для сравнения в садке 1 общее число дефектов в первом калибре уменьшилось в 10 раз при прокатке в новых калибрах, а в традиционных – только в 2 раза.

Были проанализированы дефекты в центральной части слитков, где дефекты имели в диаметре 15, 10, 7.5 и 5 мм в садках 1, 2, 4 и 5 (рис. 8).

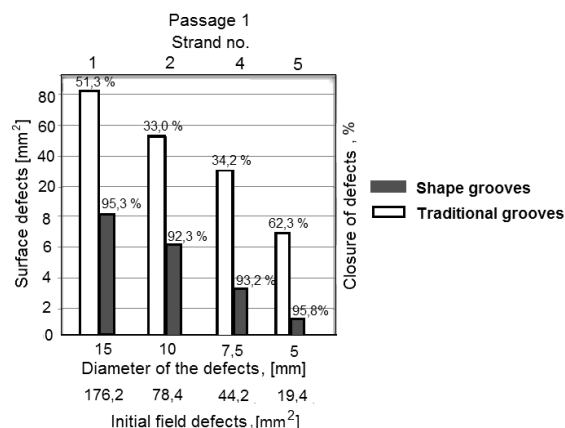


Рис. 8. Схема схлопывания дефектов разных диаметров в первом калибре

Из данных, представленных на рисунке 8, видно, что дефекты центральной части эффективнее залечивались в новых калибрах, чем в традиционных. В первом проходе новых калибров схлопывались в среднем на 94%, а традиционных только на 44%. Во втором проходе новых калибров дефекты залечивались на 100%, а в традиционных эти дефекты сохранялись даже до пятого прохода.

#### 4. Экспериментальные исследования

На первом этапе экспериментальных исследований была проведена прокатка садки с дефектами с поперечным сечением 32 x 32 [мм x



мм] на лабораторном прокатном стане D150. Калибры и образцы для исследований были соответственно откалиброваны для лабораторных исследований. Для такой уменьшенной садки также было проведено математическое моделирование для сравнения результатов с экспериментальными данными.

Исходным модельным материалом был чистый свинец, благодаря чему прокатка могла осуществляться при комнатной температуре. Следующим материалом для исследований была конструкционная сталь S355J2G3, которую нагревали в камерной печи до температуры 1150

°С. Расположение отверстий в образцах было таким же как и при моделировании. Свинцовые образцы после каждого прохода измеряли и сохраняли для дальнейшей проверки результатов (рис. 9), стальные образцы катали последовательно в трех калибрах, после чего измеряли их геометрию и проводили дальнейшие исследования. Прокатанные свинцовые образцы сканировали и обрабатывали в программе AutoCad®, где их измеряли и определяли площадь дефектов (рис. 11) на рисунках 9 и 10 представлен примерный темплет с одним из пяти дефектов.

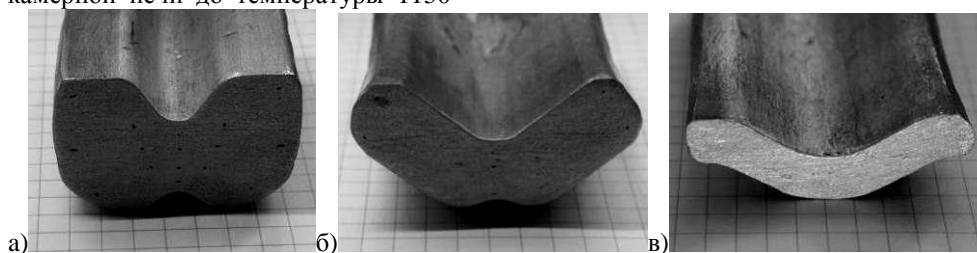


Рис. 9. Вид свинцовых темплетов полос после прокатки в каждом калибре:  
а) первый проход; б) второй проход; в) третий проход.  
Для дефектов, образующих внутренние и подповерхностные поры

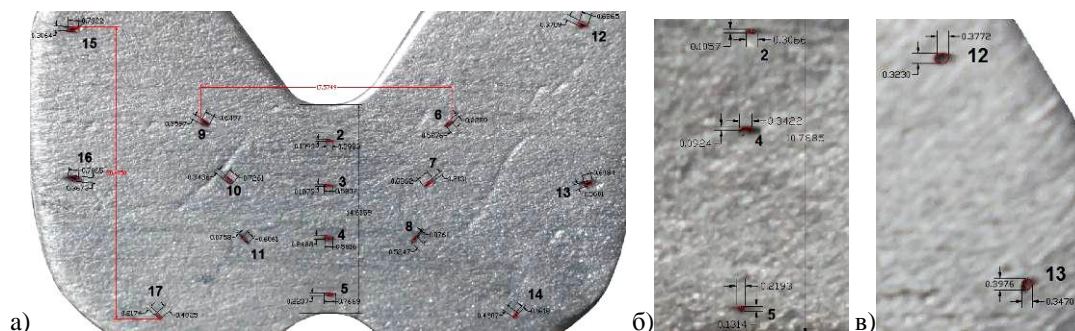


Рис. 10. Вид измеренных внутренних и подповерхностных дефектов (садка 4) на свинцовом темплете после прокатки: а) в первом калибре; б, в) во втором калибре

На следующем этапе исследований был проведен анализ изменения площади дефектов (рис. 11) и относительное изменение площади

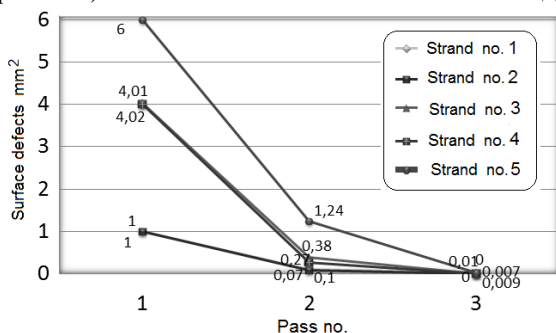


Рис. 11. Изменение площади дефектов в пяти садках в процессе прокатки в трех новых калибрах

Из данных, представленных на рисунках 11 и 12 видно, что в большинстве случаев в процессе прокатки свинцовых образцов в новых калибрах дефекты залечивались уже во втором калибре. Во всех садках с дефектами в первом калибре дефекты

дефектов (рис. 12) свинцовых образцов после прокатки в трех калибрах для каждой садки.

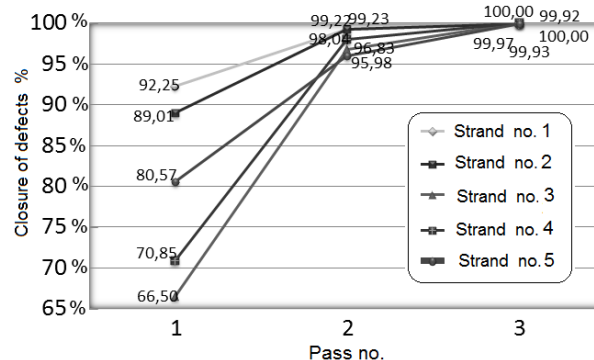


Рис. 12. Относительное изменение площади дефектов деформированных образцов в трех новых калибрах

залечивались в среднем на 80%, во втором – на 98%, а в третьем до полного схлопывания дефектов (100%) дошло практически во всех садках. После третьего калибра в образцах было сложнее всего определить дефекты.

На рисунке 13 представлен сравнительный анализ результатов экспериментальных и

теоретических исследований.

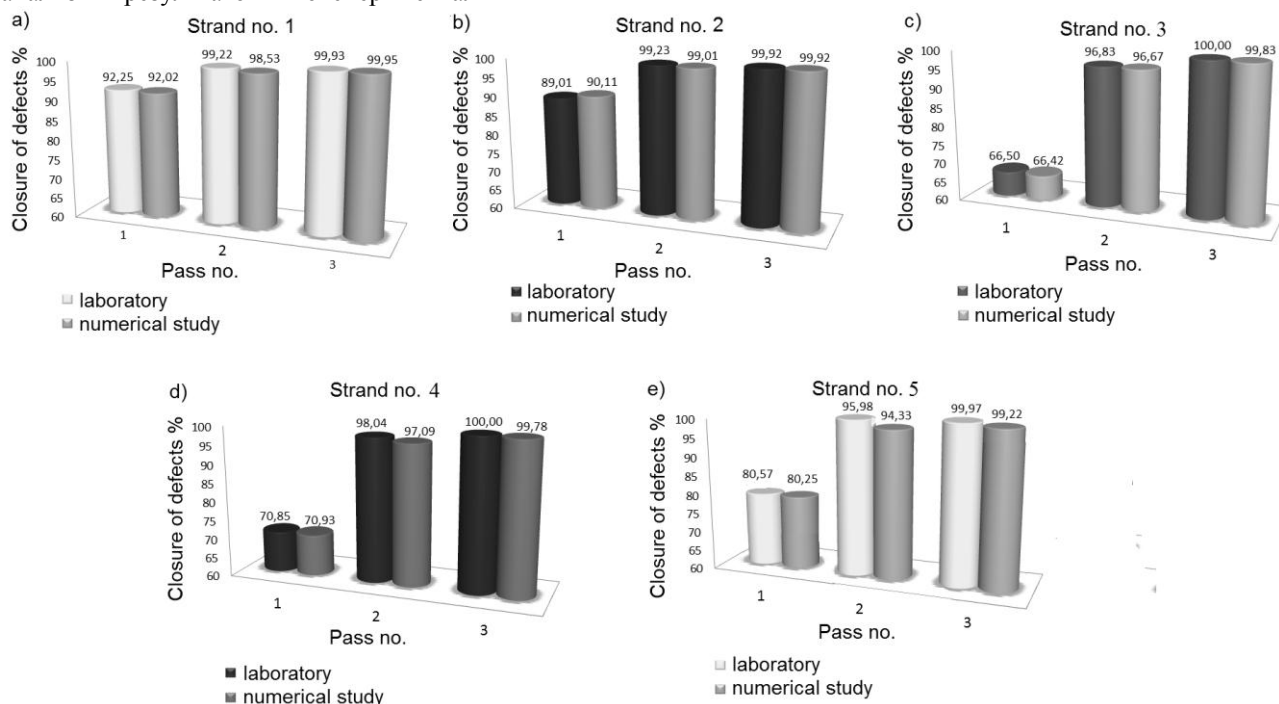


Рис. 13. Относительное изменение заличивания дефектов для пяти образцов после моделирования и экспериментальных исследований

Оставшиеся после экспериментальных исследований дефекты были меньше дефектов, полученных при проведении математического моделирования. Разница в заличивании дефектов после прокатки в первом калибре составила 0,3%, во втором – 0,7%, в третьем – 0,2%. На основании данных, представленных на рисунке 14 можно сделать вывод о том, что сохранившееся после

экспериментальных исследований дефекты были меньше дефектов, полученных при моделировании. Такая ситуация наблюдалась практически для каждого диаметра дефекта.

На следующем этапе были проведены исследований стальных образцов. На рисунке 14 представлен примерный стальной темплет после прокатки в третьем калибре.

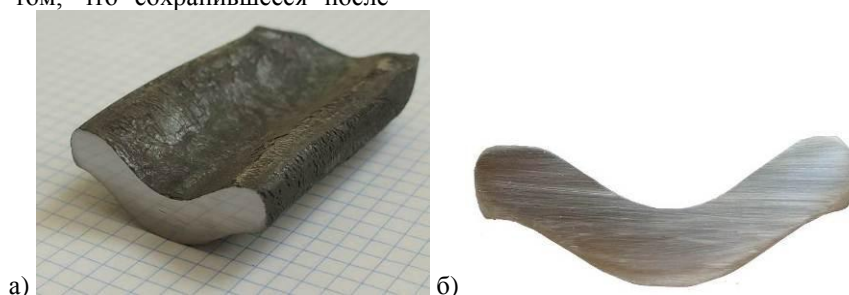


Рис. 14. Образец из стали S355J2G3 после прокатки в третьем калибре: а) вид образца после горячей прокатки; б) отсканированное изображение образца после горячей прокатки

Для исследований было подготовлено двойное количество образцов с разными видами дефектов. Образцы первой серии (б) были защищены от окисления в процессе нагрева и прокатки. Во второй серии образцов (а) поверхности отверстий были открыты. Каждому внутреннему дефекту образца был присвоен соответствующий номер (согласно обозначениям, принятым при математическом моделировании). Для

исследований на оптическом микроскопе были взяты образцы, вырезанные перпендикулярно направлению прокатки. Исследования проводились на оптическом микроскопе Nikon Eclipse MA-200. На рисунках 15÷20 представлены примеры следов дефектов деформированных образцов при увеличениях 50х и 200х.



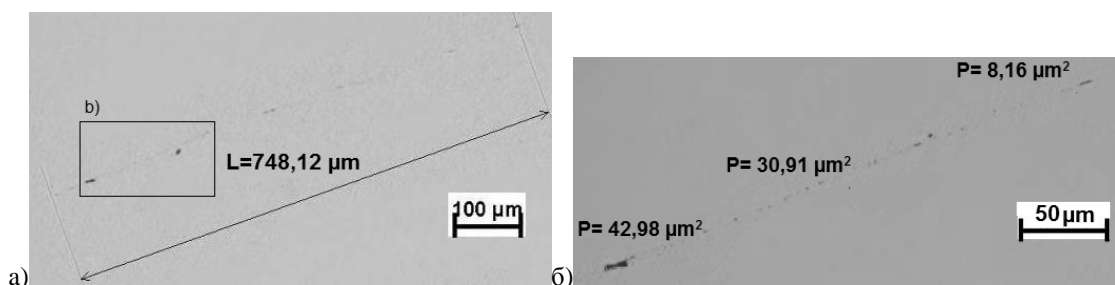


Рис. 15. Следы дефекта 5 в образце 1а после прокатки в третьем калибре:  
а) общий вид дефекта и его ширина (увеличение 50х); б) площадь поверхности составляющих дефекта 5 (увеличение 200х)

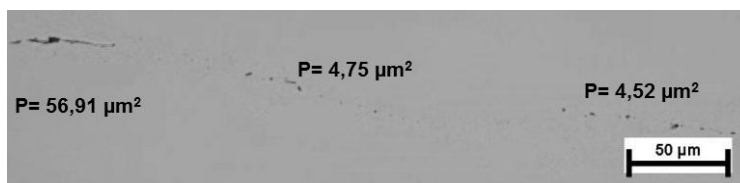


Рис. 16. Площадь поверхности составляющих дефекта 9 в образце 1а после прокатки в третьем калибре (увеличение 200х)

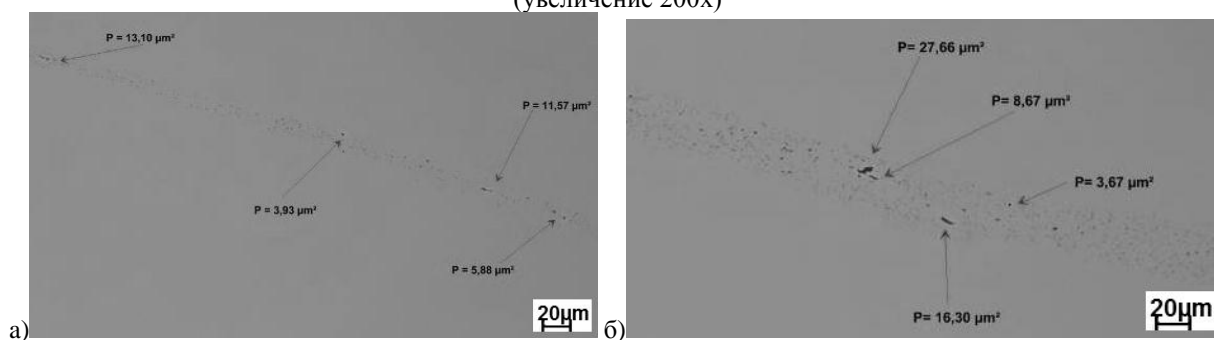


Рис. 17. Следы дефектов и площади составляющих этих дефектов в образце 2а после прокатки в третьем калибре (увеличение 200х): а) дефект 8; б) дефект 9

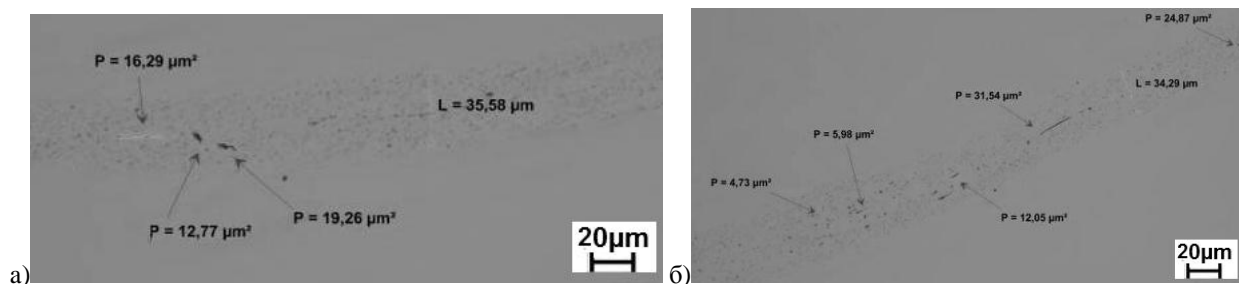


Рис. 18. Следы дефектов и площади составляющих этих дефектов в образце 3б после прокатки в третьем калибре (увеличение 200х): а) дефект 3; б) дефект 5

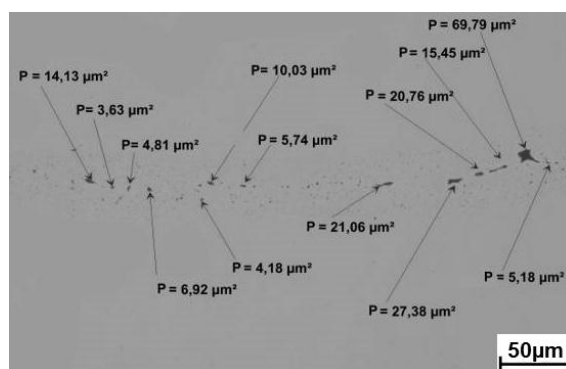


Рис. 19. Площадь части составляющих дефекта 5 в образце 4а после прокатки в третьем калибре (увеличение 200х)

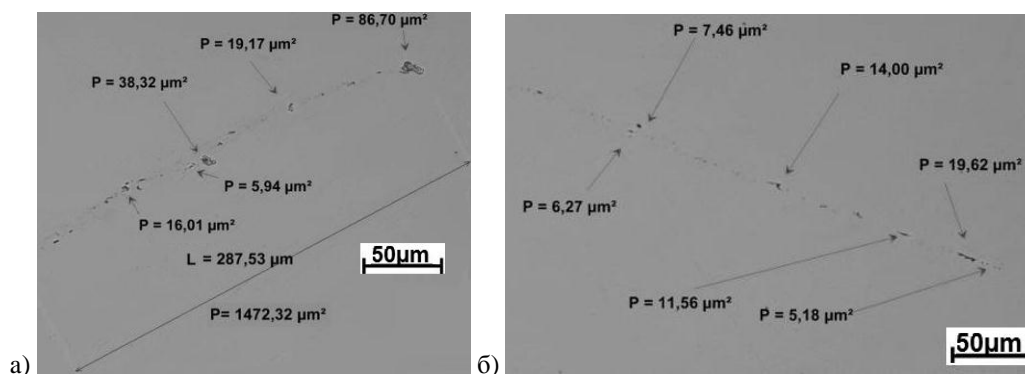


Рис. 20. Площади составляющих дефектов 8 и 10 образца 46 после прокатки в третьем калибре (увеличение 200х): а) дефекта 8; б) дефекта 10

На рисунке 21 представлены площади дефектов после прокатки в третьем калибре для каждого образца. На рисунке 22 представлено

относительное изменение общей площади дефектов каждой садки после прокатки в третьем калибре для незащищенных (а) и защищенных (б) образцов.

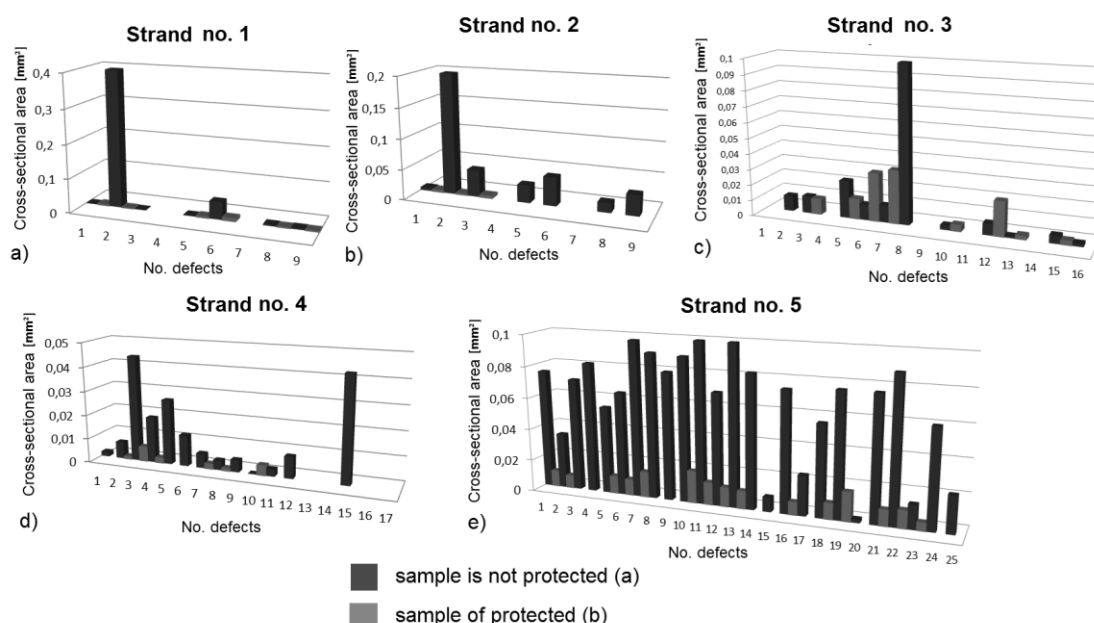


Рис. 21. Площади дефектов незащищенных (а) и защищенных (б) образцов после прокатки в третьем калибре пяти садок

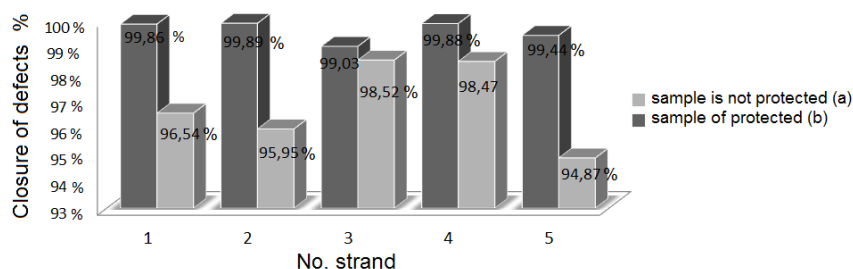


Рис. 22. Относительное изменение площади дефектов каждой садки после прокатки в третьем калибре защищенных и незащищенных образцов

Из представленных на рисунках 21 и 22 данных видно, что в садках с разными внутренними дефектами большинство из них залечилось в среднем на 99,6% в защищенных образцах и на 97% в незащищенных. Следы дефектов, которые сохранились в полосе, являются следами дефектов, большинство из которых можно считать залеченными, т.к. их характер не указывает на

возможное их дальнейшее раскрытие. Другие же следы дефектов были разбиты на меньшие фрагменты, что может привести к дальнейшему их схлопыванию в следующих проходах.

Из проведенных исследований следует, что дефекты усадочной раковины (садка 1), дефекты шущий усыдки (садка 2) и подповерхностные и внутренние дефекты (садка 4) схлопывались

наиболее эффективно, дефекты же в виде каналов залечивались хуже всего (садка 5).

## 5. Выводы

В работе представлено влияние формы начальных растягивающе-уширяющих калибров на поведение внутренних дефектов полосы. На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- На схлопывание внутренних дефектов наибольшее влияние оказывают: форма очага деформации, температура деформируемой полосы и расположение дефекта в садке. Форма калибров позволяет практически на 100% залечить очевые дефекты садки.
- Дефекты прокатки садки при традиционном процессе прокатки сохраняются до шестого прохода, при прокатке в новых калибрах эти дефекты схлопываются в большинстве случаев уже в третьем калибре.
- Форма запроектированных трех калибров благодаря введению насильного уширению позволяет эффективно залечить 99% дефектов уже после третьего калибра.
- При прокатке в новых калибрах в центре образца получена величина средних напряжений  $\sigma_m$  порядка 70 МПа, которые влияют на схлопывание дефектов уже в первых калибрах.
- Задавая достаточно большое обжатие в начальных калибрах новых калибров можно достаточно эффективно устранить дефекты непрерывнолитых заготовок, благодаря чему можно улучшить качество готовых изделий.
- Форма калибров наилучшим образом повлияла на залечивание дефектов в центральной части садки, где их расположено большее количество. 94% дефектов схлопывалось в первом калибре, а во втором уже 100%, когда в традиционных калибрах дефекты залечивались на 44%, а в некоторых случаях сохранялись до шестого прохода.
- Изменение традиционной калибровки плоского прутка 200 x 20 [мм x мм] из садки 160 x 160 [мм x мм] на калибровку в новых калибрах позволило проводить процесс прокатки только в десять проходов (без использования четырех клетей), что должно повлиять на уменьшение времени прокатки плоских прутков и одновременно снижение стоимости эксплуатации валков.
- Промышленное внедрение новой технологии прокатки должно послужить на увеличение экономического эффекта, рассчитаного за полный технологический процесс от разливки до готового изделия.

## Список литературы

1. Dyja H., Sobczak K.: The influence of rolling process parameters and lengthening grooves shape on closing internal material discontinuities. 7th International Conference Mechatronic Systems And Materials MSM 2011. Kaunas University of technology. 7 - 9 July 2011. Kaunas, ISSN 1822-8283. LITHUANIA 2011 r.; s.192
2. Sobczak K.: The analysis of the influence of strand temperature on behavior of internal material discontinuities during rolling. International Conference Of Students And Young Researchers "Topical Issues Of Rational Use Of Natural Resources". State Mining Institute Named After G.V. Plekhanov (Technical University); St. Petersburg, ROSJA; ISBN 978-5-94211-506-7 (cz.II), ISBN 978-5-94211-504-3; April 20÷22, 2011 r.; s. 20÷22
3. Sobczak K., H. Dyja: Teoretyczna analiza wpływu parametrów walcowania na przebieg zamykania się wewnętrznych nieciągłości materiałowych podczas procesu walcowania. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowa 26-27 maja 2011; pt. Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej. WIPMiFS. Monografie Nr 15, część 1. ISBN 978-83-87745-19-6. Częstochowa 2011r.; s. 348÷353
4. Sobczak K., Dyja H.: The influence of shape of grooves on the behaviour of surface defects during rolling. Advanced Metal Materials And Technologies (Ammt'2013); Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, June 25–29, 2013. St. Petersburg, ROSJA 2013r.; s. 288÷294
5. Woźniak D., Grosman F., Tkocz M.: Analiza stanów mechanicznych towarzyszących zamykaniu i spajaniu nieciągłości materiału w procesach przeróbki plastycznej. Prace IMŻ 1 (2010), Gliwice 2010. s. 68÷72
6. Woźniak D., Tkocz M., Cyganek Z.: Zmiany stanów termomechanicznych w pobliżu pęknięć w strefach przypowierzchniowej i środkowej ciągłego wlewka płaskiego w procesie walcowania na gorąco blach. Hutnik - Wiadomości Hutnicze, Nr 8 / 2009, 670÷673
7. Keife H., Stahlberg U.: Influence of Pressure on the Closure of Voids During Plastic Deformation, J. Mech Work. Technol., 4, 1980 r., s. 133÷145
8. Markuszewicz M., Haas J., Wady hutniczych wyrobów stalowych, Państwowe Wydawnictwo Techniczne Katowice 1952, PWT 73073/H;1956-D-8/240 620.19:669.14. s.223
9. Radźwicki K., Wykrywanie i usuwanie wad wlewów stalowych; Katowice: Państw. Wydaw. Techniczne, 1953. s.51