

УДК 621.7.011 : 621.982.45

Смирнов Е. Н.
Ручко В. Н.
Демченко Д. О.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И РАЗРАБОТКА ВАРИАНТА СПОСОБА «МЯГКОГО» ОБЖАТИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ СОРТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Эффективность существующих технологических и конструктивных решений, в части разработки и использования сортовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), находит свое отражение в дальнейшем увеличении объемов мирового производства непрерывнолитой сортовой заготовки [1].

Высокая конкуренция между производителями этого вида продукции вынуждает многие металлургические предприятия проявлять изобретательность в поиске методов и подходов, которые бы обеспечили решение задачи повышения его конкурентоспособности, что неразрывно связано с повышением уровня его качества, имеющего особое значение для процесса ответственного назначения [2].

Среди используемых на современных зарубежных высокоскоростных сортовых МНЛЗ подходов, которые обеспечивают требуемый уровень качества непрерывнолитой сортовой заготовки, наиболее эффективным является метод «мягкого» механического обжатия, заключающийся в дополнительном плавном обжати (на несколько миллиметров) твердой оболочки непрерывнолитой заготовки в нижней части зоны вторичного охлаждения (ЗВО), т.е. в зоне, где наблюдается определенное соотношение твердой и жидкой фазы металла [3].

«Мягкое» механическое обжатие реализуется во время отливки заготовки, путем приложения обжатия в обжимающих клетях, которые расположены последовательно по длине непрерывнолитой заготовки в зоне ее окончательной кристаллизации. При приложении обжатия, из-за возрастания гидродинамического (ферростатического) давления, жидкая ликвированная сердцевина вытесняется из зоны окончательной кристаллизации, что приводит к уменьшению осевой ликвации. Кроме того, при обжати компенсируется усадка металла при кристаллизации, а также разрушаются перемычки, которые не позволяют жидкому металлу проникнуть в зону окончательного затвердевания, что уменьшает осевую пористость, а, следовательно, улучшает качество внутренней структуры металла [4].

Практическая реализация метода «мягкого» механического обжатия находит все большее применение, как на зарубежных, так и на отечественных предприятиях, вынуждая искать комплексные решения по совершенствованию его технологических аспектов и модернизации используемого оборудования.

Целью работы является анализ существующих технологических решений, реализованных на современных МНЛЗ зарубежных и отечественных предприятий, и предложение варианта способа «мягкого» обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки.

На машине непрерывного литья SO компании Saerstahl AG реализован метод «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок в жидко-твердом состоянии. Предложен подход, в соответствии с которым, деформация заготовок осуществляется в правильно-тянущем ММО – узле. Конструкция узла включает в себя 12 роликовых пар, которые расположены на 6-ти сегментах (по две пары роликов на каждом), причем верхние входные ролики имеют привод [5].

Недостатком данного подхода является отсутствие возможности управления уровнем деформации, которая реализуется непосредственно в каждой паре роликов или группе роликов, расположенных на одном сегменте. Процесс кристаллизации заготовки является динамическим и зависит от целого ряда параметров: химического состава стали, которая разливается, скорости вытягивания слитков и т. д. Потому каждая пара роликов имеет свой фиксированный уровень обжатия, что отображает процесс кристаллизации на конкретный момент

времени. Вследствие этого, при любых колебаниях технологических параметров металл, который прилегает к фронту кристаллизации, будет получать разную степень деформации. В результате этого возможно возникновение растягивающих напряжений, которые превышают границу прочности, и, как следствие, образование, как внутренних трещин, так и трещин, которые выходят на поверхность твердой составляющей заготовки. Кроме того, в случае необходимости изменения режима обжатий, нужно корректировать положение верхнего ролика на каждой из клетей.

Попытки реализации метода «мягкого» механического обжатия нашли свое отражение на отечественном предприятии, в условиях современной сортовой МНЛЗ ПАО «Енакиевский металлургический завод». Выполненные экспериментальные исследования, свидетельствуют о достаточной степени эффективности применения процесса «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок, что необходимо учитывать при создании нового, а также совершенствовании действующего оборудования МНЛЗ [6].

Наряду с этим, характер выполненных исследований не позволяет однозначно судить об уровне изучения механизма подавления дефектов усадочного происхождения в осевой зоне непрерывнолитой заготовки и о целесообразности использования для реализации метода «мягкого» механического обжатия, именно валков эксплуатируемой ТПМ. Так, неясны принятие ограничения и допущения, которые легли в основу теоретического расчета, позволившего для непрерывнолитой заготовки сечением 150×150 мм, принять величину абсолютного обжатия равного 1,5 мм, и на основании них увеличить давление рабочей жидкости, подаваемой в поршневую полость гидроцилиндра прижатия валков ТПМ с 1,6 до 2,5 МПа. Авторами исследований не приведены оценки влияния на эффективность примененного метода «мягкого» механического обжатия таких факторов, как: скорость разливки непрерывнолитой заготовки, увеличенной с 2,65 м/мин до 3,2 м/мин; температурный режим разливки стали; равномерность охлаждения непрерывнолитой заготовки в ЗВО; марка стали и т. д. Кроме того, не подтверждено соответствие отклонений размеров получаемого сечения, в диапазоне принятого ТУ «Непрерывнолитая заготовка квадратного сечения», требованиям зарубежных стандартов на производство, имеющих особое значение для сталей ответственного назначения.

Необходимость управления процессом деформации и учета колебаний технологических параметров при использовании метода «мягкого» механического обжатия поставила задачу поиска новых подходов к его реализации, устраняющих вышеприведенные недостатки и обеспечивающий требуемый уровень качества.

Одним из таких подходов является использование циклического обжатия непрерывнолитых заготовок в соответствии, с которым, обжатие последних выполняется в агрегате циклической деформации (АЦД) со степенью деформации 60–70 % за один проход и эксцентриситетом валков 5 мм [7].

Однако, применение данного агрегата для реализации процесса деформации непрерывнолитых заготовок в жидко-твердом состоянии крайне проблематично по целому ряду причин. Во-первых, крайне большие разовые обжатия могут привести к нарушениям целостности твердой составляющей заготовки по причине возникновения трещин. Во-вторых, применение фиксированного и достаточно большого эксцентриситета валков, в свою очередь, также не является целесообразным, поскольку не учитывает размеры непрерывнолитой сортовой заготовки. Вследствие этого, возможны также трещины, особенно на поверхности слитка. В третьих, повышена вероятность возникновения дополнительных трещин в результате подобного выбора эксцентриситета, приведет, в дальнейшем, к снижению качества конечного металлопроката, который будет производиться из этих заготовок.

Дальнейший поиск подходов к реализации метода «мягкого» механического обжатия непрерывнолитых заготовок позволил предложить способ обжатия непрерывнолитого бруса или заготовки в жидко-твердом состоянии, который осуществляют за два этапа в клетях, последовательно расположенных по их длине в зоне окончательного затвердевания. На первом этапе, бруском или заготовку обжимают валками первого ряда, смещенными один относительно другого в горизонтальной плоскости на угол $2-6^\circ$. Центральные участки бруса или заготовки,

шириной, которая равняется ширине жидкой фазы, обжимают со степенью деформации 0,6–1,2 %, а конечные участки – со степенью деформации не меньше чем 50 % от центральных участков. На втором этапе, валками второго ряда обжимают частично деформированные конечные участки, со степенью деформации, которая равняется разнице между деформацией центральных и конечных участков на первом этапе [8].

Недостатком данного способа является сложность достижения повышенного уровня проработки слоев металла, и возможность его реализации только в тех случаях, когда ширина деформируемого непрерывнолитого слитка – достаточно большая, то есть, когда слитком является блях. В случае, применения предлагаемого способа к условиям непрерывнолитой сортовой заготовки, требуемый эффект будет крайне мал. Это объясняется тем, что ширина непрерывнолитой сортовой заготовки обычно колеблется в границах от 100 до 150 мм. Тогда, возникающие в результате скрещивания валков дополнительные деформации сдвигов, имеют крайне низкий уровень, что значительно уменьшает позитивный эффект от действия деформаций сдвигов. Последующее увеличение их уровня возможно лишь благодаря увеличению угла скрещивания, однако это, в свою очередь, приводит к существенным проблемам во время организации передачи крутящего момента от двигателя к валкам.

Кроме того, к недостаткам данного способа следует отнести и то, что при его реализации, в случае наличия на контактирующей поверхности непрерывнолитой сортовой заготовки мелких поверхностных дефектов в виде трещин, (возникают всегда в случае нечеткой работы ЗВО), дополнительные деформации сдвигов поперечного направления будут приводить к последующему раскрытию трещин. Вследствие этого, во время нагрева такой заготовки в печах, боковые поверхности таких трещин будут окисляться и не свариваться при последующей деформации. Это приведет к ухудшению качества конечного металлопроката.

Выполненный анализ технологических решений, реализованных в условиях современных зарубежных и отечественных сортовых МНЛЗ, и подходов к реализации метода «мягкого» механического обжатия непрерывнолитых заготовок, позволил наметить пути к устранению перечисленных выше недостатков и осуществить разработку варианта, учитывающего положительные характеристики перечисленных выше способов и устраняющего их недостатки.

В основу предлагаемого варианта (рис. 1) поставлена задача осуществления «мягкого» механического обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки – методом последовательной циклической деформации в блоке обжимных клетей, что позволит повысить, как уровень проникновения внешней деформации во внутренние слои металла, так и обеспечить действие дополнительных продольных сдвиговых деформаций в контактных с валками обжимных клетей слоях. Это, в свою очередь, даст возможность уменьшить осевую пористость и ликвацию, а также, снизить количество трещин, что обеспечит общее повышение качества непрерывнолитой сортовой заготовки.

Поставленная задача решается путем реализации способа «мягкого» механического обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки с начальной высотой h , находящейся в жидкотвердом состоянии, за два этапа – в блоке обжимных клетей, включающем два сегмента, каждый из которых состоит из двух пар валков, последовательно расположенных по ее длине в зоне окончательного затвердения.

На первом этапе, заготовку 1 с отношением высоты h к диаметру D валков обжимных клетей 2 в пределах $h/D = 0,285–0,429$ – последовательно циклически обжимают со степенью относительной деформации ε в пределах $\varepsilon = 0,5–2,5$ %, верхним валком первой клетки (первый сегмент), установленным с эксцентриситетом e на уровне $e/h = - (0,0066–0,025)$, а затем, ликвидируют начальный гребень, высотой h_2 – верхним валком второй клетки (первый сегмент), имеющим эксцентриситет противоположного знака на уровне $e/h = + (0,0066–0,025)$.

На втором этапе, обжимают образованные окончательные циклические наплывы высотой h_n – валками третьей и четвертой клетки (второй сегмент), со степенью относительной деформации ε , которая не меньше или равняется разнице между высотой, деформированной на первом этапе заготовки по наплывам и впадинам.

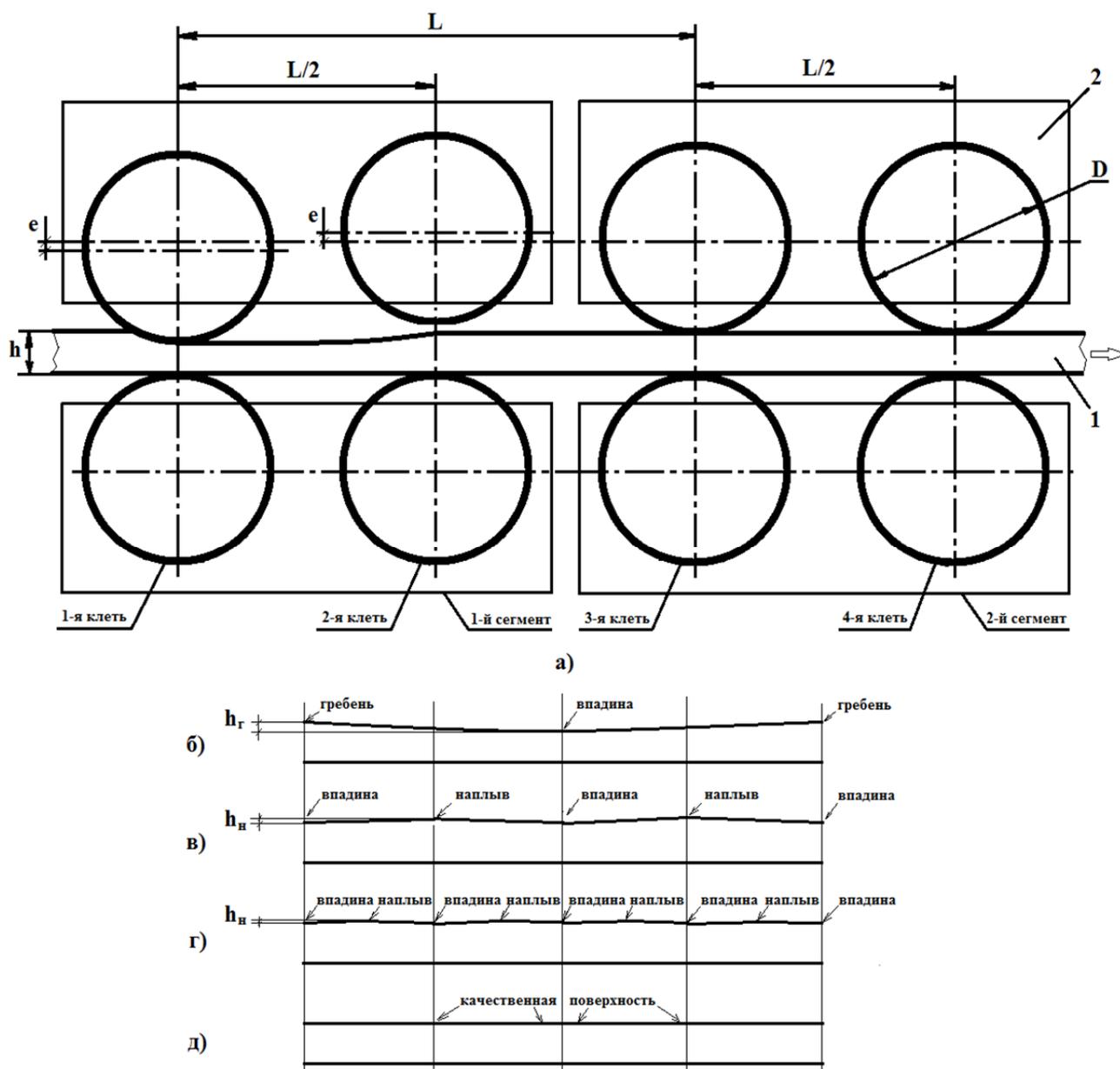


Рис. 1. Вариант способа «мягкого» обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки:
 а – общий вид варианта способа «мягкого» обжатия; б, в, г, д – последовательность изменения поверхности НЛЗ после обжатия валками, соответственно, 1-й клетки 1-го сегмента, 2-й клетки 1-го сегмента, 3-й клетки 2-го сегмента и 4-й клетки 2-го сегмента; 1 – непрерывнолитая заготовка; 2 – блок обжимных клеток; L – расстояние между валками 1-ой и 3-й клетями ($L = \pi D$); $h_г$ – высота гребня; $h_н$ – высота наплыва

Предлагаемый вариант способа «мягкого» обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки осуществляется следующим образом. Непрерывнолитая заготовка получает деформацию в зоне предполагаемого окончательного затвердевания, когда она находится в двухфазном состоянии в блоке обжимных клеток, расположенных по длине заготовки в этой зоне, в несколько этапов. Во время обжатия заготовки в таком состоянии, происходит вытеснение жидкой ликвационной сердцевины из зоны конечного затвердения, а также компенсируется усадка металла. Вследствие этого происходит снижение осевой пористости и ликвации.

Применение циклического обжатия валками 1-ой и 2-ой клеток (1-ый сегмент), обусловлено, с одной стороны, особенностью кристаллизации непрерывнолитых сортовых заготовок в условиях высокоскоростных современных МНЛЗ, а с другой стороны – существующими

колебаниями технологических параметров разливки и многостадийного охлаждения. В этом случае, в результате значительно меньших радиусов кривизны технологической линии сортовых МНЛЗ, по сравнению с блюмовыми МНЛЗ (8–10 м против 14–20 м) и существенно меньшей металлургической длины заготовки, на которой происходит полная кристаллизация металла, в последних возникают значительно больше градиентов неравномерности механических свойств, и, в первую очередь, прочностных. В результате этого, растет частица упругой составляющей в общей деформации сортовой заготовки. Вместе с тем, придание валкам обжимных клетей эксцентриситета будет способствовать более полному проникновению деформации во внутренние слои металла заготовки. Кроме того, реализация в этом случае обжатия, которое изменяется циклический, будет целесообразным, поскольку будет способствовать возникновению дополнительных деформаций сдвигов, которые имеют продольное направление. Наличие отмеченных деформаций приведет к более качественной проработке слоев металла сортовой заготовки, благодаря возникновению внутреннего межслоевого течения металла.

Дополнительное введение в технологический процесс возможности, относительной циклической деформации в рамках одного сегмента двумя парами валков, которые имеют согласованный противоположного знака эксцентриситет, является целесообразным, потому что позволяет четко руководить уровнем обжатия в каждой паре валков. Такая возможность обусловлена наличием колебаний технологических параметров разливки, которые приводят, в свою очередь, к колебаниям толщины твердой корки вертикальных граней слитка. Однако технологический регламент процесса непрерывной разливки не позволяет колебаться параметрам в пределах более чем 2%. В этом случае, наличие эксцентриситета e на уровне $e/h = \pm (0,0066-0,025)$ будет гарантировать возможность обжатия заготовок непосредственно той величиной, которая четко отвечает состоянию жидко-твердой составляющей, в данной точке металлургической длины. Уменьшение уровня эксцентриситета, менее чем $e/h = 0,0066$ будет приводить к тому, что в некоторых случаях будет невозможно компенсировать влияние колебаний технологических параметров на состояние заготовки в отмеченной точке металлургической длины. Вследствие этого, составляющая сечения заготовки, которая подверглась кристаллизации, будет обжиматься с меньшим уровнем, чем нужно. Следовательно, на этом участке не возникнет первичного нарушения целостности перемычек типа «мост» в осевой жидко-твердой составляющей непрерывнолитой заготовки. Увеличение эксцентриситета e , более чем $e/h = 0,025$ нежелательно, поскольку в этом случае возможно повышение уровня деформационной обработки заготовки, чем это необходимо. В этом случае, возможно возникновение дополнительных растягивающих напряжений существенного уровня. Следовательно, значительной становится достоверность нарушения цельности твердой составляющей заготовки, которая закристаллизовалась на этот момент.

Процесс обжатия заготовки в двух парах валков, которые имеют одинаковый, но противоположного знака, эксцентриситет e имеет ряд позитивных моментов. Во-первых, использование клетей, в которых валки имеют эксцентриситет противоположного знака, позволит ликвидировать возникающую волнистость на поверхности заготовки, благодаря взаимной компенсации величин эксцентриситета валков. Во-вторых, каждый участок поверхности заготовки получает одинаковый уровень дополнительных сдвиговых деформаций продольного направления. В-третьих, наличие на каждой паре валков, эксцентриситета противоположного знака, имеет позитивное влияние, как на валки, так и на деформацию внутренних слоев металла заготовки. В этом случае, в валках 1-ой клетки возникают внутренние межслоевые сдвиги вдоль направления вытягивания. В то же время, в валках 2-ой клетки возникают сдвиги противоположного направления, а именно – против направления вытягивания. Такой характер внутреннего течения металла приводит к повышенной вероятности нарушения внутренних твердых «мостов» и, как следствие, более качественной макроструктуры непрерывнолитой сортовой заготовки.

С учетом предыдущего, правомерным является выбор интервала степени деформации ε в пределах $\varepsilon = 0,5\text{--}2,5\%$. Применение обжатий со степенью деформации менее $0,5\%$, приведет к недостаточному проникновению деформации в середину заготовки и к снижению эффективности процесса, в результате наличия упругой составляющей (на уровне $40\text{--}50\%$) в общей деформации, прилагаемой к непрерывнолитой заготовке. Применение обжатий со степенью деформации более $2,5\%$ приведет к появлению высоких напряжений на границе фронта кристаллизации, которая может вызывать осевые трещины.

Ограничение применения предложенного способа в пределах отношения высоты h заготовки к диаметру D валков в пределах $h/D = 0,285\text{--}0,429$, обусловлено особенностями сортамента заготовки, который отливается (традиционно сечение от 100×100 мм до 150×150 мм) и особенностями конструкции МНЛЗ на участке тянуще-правильных клетей. Для указанного типа МНЛЗ характерным является то, что обычно машина имеет от 3 до 7 ручьев. При этом расстояние между ручьями крайне мало, и обусловлено конструкцией промежуточного ковша. В этом случае уменьшения отношения h/D менее чем $0,285$ приведет к различным проблемам, связанным непосредственно со стойкостью валков. При этих скоростях вытягивания на валках малого диаметра очень быстро возникает сетка разгара, которая значительно сокращает их срок использования. Кроме того, на сталях, которые имеют повышенное содержание марганца (типа 09Г2С, 17ГСУ и другие) будет наблюдаться значительное налипание окалины на поверхность валка. Налипание окалины на поверхность валка приведет в дальнейшем к значительному ухудшению качества поверхности заготовки благодаря тому, что на ней будут наблюдаться отпечатки от окалины, глубина которых будет достаточно значительной. В дальнейшем, во время прокатки отмеченные отпечатки крайне трудно выкачиваются.

Применение процесса обжатия образованных окончательных циклических наплывов валками 3-й и 4-й клетки (2-й сегмент), со степенью деформации, которая не меньше или равняется разнице между высотой, деформированной на первом этапе (1-й сегмент) заготовки по выступлениям и впадинам, позволяет исключить окончательную волнистость контактирующей поверхности заготовки, которая возникает после первого этапа деформации. Ликвидация окончательных наплывов на поверхности заготовки не в одной, а в двух клетях (3-й и 4-й) следующего (2-го) сегмента обусловленная тем, что в случае деформации в одной клетке, существует большая вероятность возникновения на ней морщин, которые являются нежелательными. В случае использования более мелкой степени деформации в каждой из клеток, с сохранением их суммы на уровне разницы, между высотой, деформированной на первом этапе заготовки, по напльвам и впадинам, или большей, будет обеспечено, как плавный характер ликвидации окончательных наплывов, так и высокое качество поверхности заготовки. Кроме того, позитивный момент имеет и существующая возможность дополнительной деформации заготовки гладкими валками 4-й клетки 2-го сегмента.

Для оценки возможности практического осуществления предлагаемого варианта способа «мягкого» обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок в условиях реального производства, предварительно, на пластилиновых образцах длиной ≈ 350 мм и размером сечения 30×30 мм (рис. 2), валками одной клетки, верхний из которых был изготовлен с эксцентриситетом вращения, были выполнены исследования особенностей влияния предлагаемого способа деформации на поверхность (рис. 3) и внутреннюю структуру образцов, в условиях стана 100 лаборатории прокатки кафедры ОМД ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет».



Рис. 2. Вид пластилинового образца после разливки и нанесения координатной сетки

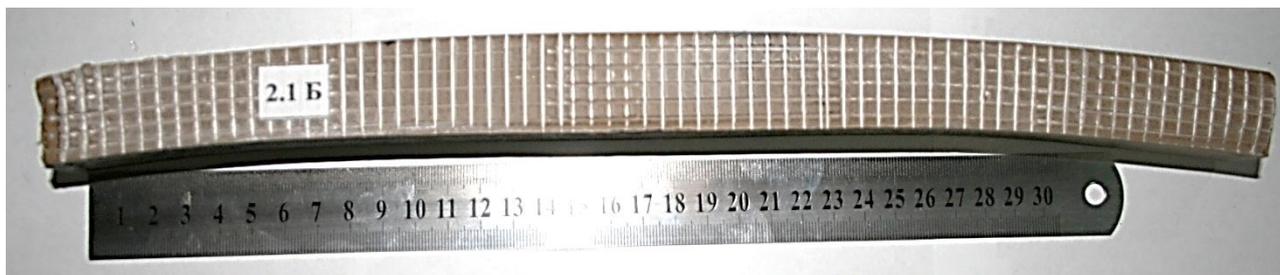


Рис. 3. Вид пластилинового образца, подвергнутого циклическому обжатию

ВЫВОДЫ

На основе выполненного анализа существующих технологических решений использования способа «мягкого» механического обжатия в условиях современных сортовых МНЛЗ зарубежных и отечественных предприятий, предложен вариант циклического способа «мягкого» обжатия непрерывнолитой сортовой заготовки, включающий два этапа деформации в блоке обжимных клетей, состоящего из двух сегментов, каждый из которых состоит из двух пар валков, последовательно расположенных по ее длине в зоне окончательного затвердения.

Предложенный способ обеспечивает однородность деформации непрерывнолитой заготовки по всей металлургической длине, способствующее уменьшению осевой пористости и ликвации, а также, снижению числа трещин, что обеспечит повышение качества непрерывнолитых заготовок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А. Н. *Современные сортавые МНЛЗ : перспективы развития технологии и оборудования* / А. Н. Смирнов, А. Л. Подкорытов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 2 (260). – С. 61–65.
2. Минаев А. А. *Совмещенные металлургические процессы* / А. А. Минаев. – Донецк : Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.
3. Смирнов А. Н. *Непрерывная разливка стали : учебник* / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – 482 с.
4. Бровман М. Я. *Непрерывная разливка металлов* / М. Я. Бровман. – М. : ЭКОМЕТ, 2007. – 484 с.
5. *Мягкое обжатие заготовок на машине непрерывного литья SO компании Saarlust AG* / Р. Толи, В. Остхаймер, Г. Ней [и др.] // *Черные металлы*. – 2007. – Июль–август. – С. 49–55.
6. Куберский С. В. *Экспериментальные исследования процессов мягкого обжатия непрерывнолитых сортовых заготовок в промышленных условиях* / С. В. Куберский, С. М. Стриченко, А. В. Завгородний // *Прикладная механика*. – 2011. – № 4/7 (52). – С. 41–43.
7. Туев М. Ю. *Исследование процесса циклической деформации непрерывнолитых заготовок* / М. Ю. Туев, О. С. Лехов, И. В. Кишин // *Производство проката*. – 2009. – № 10. – С. 2–4.
8. Патент 89961 С2 Украина. МПК⁹ В 22 D 11/12. *Спосіб обтиснення безперервнолитого бльома або заготовки у рідкотвердому стані* / Смирнов Є. М., Смірнов О. М., Скляр В. О., Горбенко О. І., Моцний В. В.; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет. – № а200700576; заявл. 22.01.2007; опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6.

Смирнов Е. Н. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;

Ручко В. Н. – канд. техн. наук, доц. ДонНТУ;

Демченко Д. О. – магистр ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: smirnov@fizmet.dgtu.donetsk.ua; vlad@mech.dgtu.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 13.01.2012 г.