

УДК 621.791

Влияние технологических параметров на формирование пристеночного валика при многопроходной сварке в защитных газах

Д.С. Бузорина, М.А. Шолохов

Для получения качественных сварных соединений при изготовлении ответственных металлоконструкций (мосты, спецтехника, трубопроводы и др.) существуют жесткие ограничения погонной энергии сварки. В условиях ограничения погонной энергии при многопроходной сварке из-за повышенного теплоотвода в основной металл в зоне сплавления присадочного металла с кромкой разделки возрастает вероятность образования несплавлений.

Эффективное управление проплавлением возможно при наличии аналитических зависимостей влияния основных и вспомогательных параметров режима сварки на проплавление основного металла при бездефектном формировании пристеночного валика.

Методом математического планирования полнофакторного эксперимента получены аналитические зависимости площади сечения пристеночного валика и полного теплового КПД процесса сварки от угла разделки, положения электрода в разделке и скорости сварки. Определены наиболее значимые параметры, влияющие на формирование пристеночного валика при условии отсутствия несплавлений. Данными параметрами при заданных сварочном токе, напряжении и диаметре электрода являются положение электрода в разделке и скорость сварки. Исследование показало, что смещение электрода к кромке увеличивает тепловложение в свариваемый металл, следовательно, способствует повышению производительности и качества сварных соединений процесса сварки. Повышение скорости сварки до определенного значения способствует увеличению глубины проплавления за счет уменьшения жидкой прослойки под дугой, следовательно, производительности КПД процесса сварки и качества сварных соединений.

Ключевые слова: пристеночный валик, многопроходная сварка, полный тепловой КПД процесса сварки, полнофакторный эксперимент, математическое моделирование.

The influence of technological parameters on the formation of a wall bead during multi-pass welding in shielding gases

D.S. Buzorina, M.A. Sholokhov

High-quality welding in vital metal structures, such as bridges, machinery, pipes, etc., imposes strict limitations on the power supply per unit length. In the



БУЗОРИНА
Дарья Сергеевна
(ООО «Шторм»)

BUZORINA
Dar'ya Sergeevna
(Upper Pyshma, Russian Federation, LLS «Storm»)



ШОЛОХОВ
Михаил Александрович
(ООО «Шторм»)

SHOLOKHOV
Mikhail Aleksandrovich
(Upper Pyshma, Russian Federation, LLS «Storm»)

case of multi-pass welding, the buildup of heat transfer to the base metal in the area, where the filler metal and the edge fuse together, increases the possibility of faulty fusion. To control the quality of welding, analytical relationships between the primary and secondary welding parameters and the base metal penetration depth under the flawless wall bead formation are required. The method of mathematical planning of the full factorial experiment was used to derive analytical dependences of the wall bead cross-section area and the total thermal efficiency of the welding process on the groove angle, electrode position in the grooving, and the welding speed. The most significant parameters affecting the formation of the wall bead without faulty fusion are determined. For a given welding current, voltage, and electrode diameter, the input data include the position of the electrode in the grooving and the welding speed. The study showed that shifting the electrode to the edge increases the heat transfer to the base metal and, consequently, increases the efficiency and quality of the welding process. Increasing the welding speed to a certain value increases the penetration depth due to the decrease of a liquid layer thickness under the arc and, therefore, improves the efficiency of the welding process and the weld quality.

Keywords: wall bead, multi-pass welding, total thermal efficiency of the welding process, full factorial experiment, mathematical modeling.

Наиболее технологически значимый параметр, определяющий геометрию шва и качество сварного соединения, — глубина проплавления свариваемого металла и площадь сечения сварного шва [1, 2]. Анализ литературы по этой теме [3, 4] показал, что основными дефектами при многопроходной сварке являются несплавления преимущественно при наложении пристеночных валиков. Подобные дефекты создают значительные трудности в реализации процессов сварки горизонтальных швов плавящимся электродом корпусных конструкций специальной техники [5]. Для получения сварных швов с требуемыми механическими свойствами, благоприятной мелкозернистой структурой и минимальными сварочными деформациями и требуемой формой швов необходимо ограничивать погонную энергию.

Однако при многопроходной сварке в условиях ограничения погонной энергии вероятность образования несплавлений между валиком и кромками разделки, а также между соседними валиками вследствие повышенного теплоотвода в основной металл существенно возрастает. Наиболее распространенным способом управления проплавлением основного металла при сварке, как эффективный способ исключения несплавлений, является изменение параметров процесса (ток, напряжение, скорость сварки), определяющих тепловложение, а, следовательно, условия формирования сварного шва, в частности, глубину проплавления кромок [6, 7]. В работе [4] приведены результаты исследования влияния параметров режима (сварочного тока обратной полярности, напряжения дуги, скорости сварки, расстояния между концом электрода и кромкой) сварки на форму пристеночного валика при сварке под флюсом и сделан вывод о том, что параметром, характеризующим механическое заклинивание шлаковой корки, является угол перехода поверхности пристеночного валика к кромке. Определены основные параметры режима: напряжение дуги, расстояние между концом электрода и кромкой, скорость сварки. Однако в данной работе не рассмотрены вопросы влияния угла разделки на вероятность возникновения несплавлений у кромок разделки. В этой связи изучение вопросов влияния технологических параметров на формирование пристеночного валика при многопроходной сварке горизонтальных швов весьма актуально.

Цель работы — установление зависимостей между параметрами наплавки пристеночного валика при многопроходной механизированной сварке в защитных газах швов и вероятностью возникновения дефектов типа несплавления у кромок разделки.

Эффективное управление процессом проплавления свариваемого металла в условиях дуговой сварки возможно лишь только после установления основных закономерностей этого процесса, а также качественного и количественного анализа влияния основных и вспомогательных параметров режима сварки на размеры и форму зоны проплавления. В основу

большинства математических моделей, создаваемых для управления сварочными процессами, заложены статистически выявляемые зависимости между энергетическими параметрами режима сварки (сварочный ток, напряжение на дуге, скорость сварки и т. д.), с одной стороны, и параметрами, характеризующими качество сварного соединения, с другой стороны. Такой подход позволяет установить зависимость площади сечения пристеночного валика и полного теплового КПД процесса сварки от угла разделки, положения электрода в разделке и скорости сварки при условии бездефектного формирования пристеночного валика. Поэтому для минимизации дефектов типа несплавлений у кромок разделки при сварке горизонтальных швов проведены исследования влияния технологических параметров (угла разделки α , положения электрода в разделке — расстояние между концом электрода и кромкой — координата x , а также скорости сварки $v_{св}$) на площадь сечения пристеночного валика и на полный тепловой КПД процесса сварки при механизированной сварке в защитных газах. Характерные параметры сварки приведены на рис. 1.

При сварке в горизонтальном положении в основном образуются несплавления с верхней кромкой, поэтому для уменьшения объема наплавленного металла (повышения производительности) угол раскрытия нижней кромки следует уменьшать (рис. 1, а).

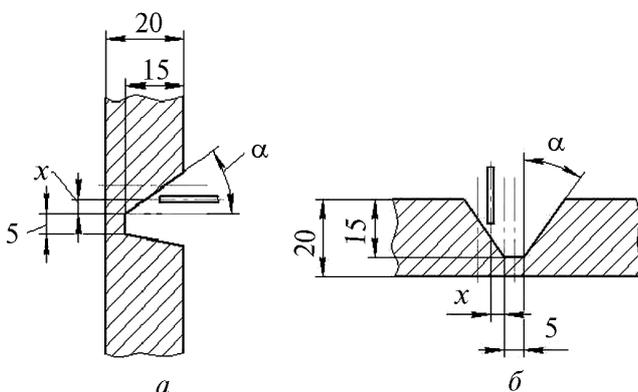


Рис. 1. Схема наложения валиков:
а — в горизонтальном положении;
б — в нижнем положении

Эффективность использования тепловой энергии дуги на образование сварного соединения оценивали по полному тепловому КПД процесса сварки η , который определяет отношение условного теплосодержания расплавленного за единицу времени металла шва к тепловой мощности сварочного источника нагрева [7]:

$$\eta = \frac{v_{св} F_{ш} \gamma_m H_{пл}}{Q} = \frac{v_{св} (F_n + F_{пр}) \gamma_m H_{пл}}{Q} = \eta_n + \eta_{пр},$$

где $v_{св}$ — скорость сварки, м/с; $F_{ш}$ — площадь поперечного сечения шва, м²; F_n — площадь сечения наплавленного металла, м²; $F_{пр}$ — площадь проплавления основного металла, м²; γ_m — удельная плотность металла, кг/м³, для низкоуглеродистой стали $\gamma_m = 7850$ кг/м³; $H_{пл}$ — энтальпия при температуре плавления с учетом открытой теплоты плавления, Дж/кг, для низколегированной стали принимают $H_{пл} = 1340$ Дж/г [7]; Q — тепловая мощность сварочного источника нагрева, $Q = IU$, Дж/с; η_n — полный тепловой КПД процесса наплавки; $\eta_{пр}$ — полный тепловой КПД процесса проплавления основного металла [8]. При выполнении расчетов учитывали распределение тепловой мощности дуги в разделке [9].

Сварку выполняли путем наложения пристеночных валиков в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. При проведении экспериментов использовали образцы из стали 09Г2С. Образец представляет собой пластину размерами 200×500×20 мм. На пластине выполнены канавки, имитирующие сварное соединение с разделкой кромок (углы разделки — 15°, 25°, 35°) с притуплением, заменяющим выполненный корневой проход.

Установка для проведения экспериментов состояла из стола с токоподводом, механизма перемещения горелки Noboruder NB-5H, сварочного аппарата S5 Pulse ШТОРМ-LORCH (рис. 2). Параметры режима сварки регистрировали с помощью приборов, установленных на пульте управления аппарата.

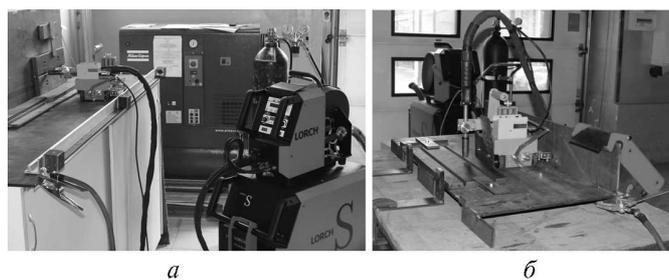


Рис. 2. Общий вид установки для сварки:
 а — в горизонтальном положении;
 б — в нижнем положении

Технические характеристики сварочного аппарата, использованного при проведении исследований приведены ниже:

Диапазон регулирования сварочного тока, А	25—400
Регулировка напряжения	Плавная
Защитный газ	Смесь газов, CO ₂
Диаметр электродной проволоки, мм	0,6—1,6
Ток при 100% ПВ, А	350
Ток при 60% ПВ, А	400
ПВ при максимальном токе, %	75
Сетевое напряжение, В	3~400
Допустимый перепад в сети, %	±15
Размер источника питания (Д×Ш×В), мм	1116×464×812
Масса источника питания, кг	97,3

Для сварки применялась проволока сварочная Св-08Г2С диаметром 1,2 мм по ГОСТ 2246—70, смесь защитных газов — аргон 82%, углекислый газ 18% по ТУ 2114-004-00204760—99.

Значения факторов изменяли в соответствии с планом полнофакторного эксперимента:

Параметр	Фактор	Значение		
		-1	0	+1
x_1	Угол разделки α , град	15	25	35
x_2	Расстояние от оси до электрода x , мм	0	1,5/2/4	2,5/4/7
x_3	Скорость сварки, м/ч	18	24	30

Режимы сварки подбирали таким образом, чтобы обеспечить удовлетворительное формирование шва в соответствии с конструктивны-

ми и эксплуатационными требованиями к корпусным конструкциям специальной техники.

При проведении экспериментов использовали следующий режим сварки:

- сварочный ток (217±10) А;
- скорость подачи проволоки 6,3 м/мин;
- напряжение дуги (21,4±1) В;
- расход защитного газа 18 л/мин;
- диаметр электрода 1,2 мм;
- вылет электрода (20±1) мм.

Из сваренных образцов были изготовлены макрошлифы (рис. 3), на которых определяли площади сечения валика. По результатам измерений рассчитали полный тепловой КПД процесса сварки.

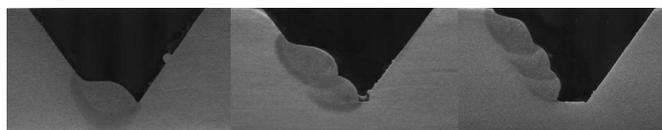


Рис. 3. Примеры макрошлифов образцов, сваренных в нижнем положении

После обработки результатов экспериментов с помощью прикладных компьютерных программ были получены следующие регрессионные уравнения:

$$F = 47,498 - 0,031x_1 + 4,205x_2 - 0,956x_3 - 0,113x_1x_2 + 0,003x_1x_3 - 0,143x_2x_3 + 0,004x_1x_2x_3; \quad (1)$$

$$\eta = 0,1253 - 0,00055x_1 + 0,018x_2 + 0,0239x_3 + 0,00006x_2^2 - 0,0005x_3^2 - 0,0005x_1x_2 + 0,00012x_1x_3 - 0,00013x_2x_3, \quad (2)$$

где F — площадь сечения валика, мм²; η — полный тепловой КПД процесса сварки; x_1, x_2, x_3 — кодированные значения факторов.

Проверка значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента при 5%-ном уровне значимости показала незначимость некоторых из них. После их исключения уравнения приняли следующий вид:

$$F = 47,498 + 4,205x_2 - 0,956x_3; \quad (3)$$

$$\eta = 0,1253 + 0,018x_2 + 0,0239x_3. \quad (4)$$

Проверка адекватности полученной модели по F -критерию Фишера дала положительные результаты. Это свидетельствует о том, что подставив в уравнения (3), (4) значения параметров можно с достаточной точностью опреде-

лить площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки.

Дополнительно адекватность полученных уравнений оценивали по двумерным диаграммам рассеяния, которые традиционно используются для визуального исследования зависимости между двумя переменными на плоскости, поскольку они предоставляют больше информации, чем при оценке по значениям коэффициента корреляции: координаты положения каждой точки на диаграмме соответствуют значениям сразу двух переменных. Если точки данных не попадают на диагональную линию, то эту диаграмму можно дополнительно использовать для наглядной проверки полноты уравнения регрессии и соответствия распределения к экспериментальным данным. Результаты дополнительной проверки адекватности экспериментальных и расчетных значений площа-

ди сечения валика и теплового КПД процесса сварки приведены на рис. 4.

Из полученных уравнений (3), (4) следует, что при заданных начальных условиях сварки (ток, напряжение) угол разделки не оказывает влияния на площадь сечения валика и на тепловой КПД процесса сварки.

Наиболее существенными факторами являются: для площади сечения валика — положение электрода в разделке, для полного теплового КПД — скорость сварки.

Анализ полученных в результате эксперимента зависимостей площади сечения валика и полного теплового КПД процесса сварки от скорости сварки показал, что при смещении электрода к кромке площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки увеличиваются, поскольку повышается тепловложение в кромку свариваемого металла. При увеличении скорости сварки площадь сечения валика уменьшается, а полный тепловой КПД процесса сварки повышается только до определенного значения. Это связано с тем, что с увеличением скорости сварки количество наплавленного металла на единицу длины шва уменьшается [10, 11], но при этом с ростом скорости сварки столб дуги начинает отклоняться в сторону, противоположную направлению сварки. Отклоняясь, столб дуги вытесняет часть жидкого металла в хвостовую часть ванны. Уменьшение толщины жидкой прослойки под дугой способствует увеличению глубины проплавления при повышении скорости сварки до определенной величины. При дальнейшем повышении скорости в связи с уменьшением погонной энергии глубина проплавления уменьшается.

По полученным уравнениям можно подбирать параметры наплавки пристеночного валика, обеспечивающие отсутствие несплавлений при минимально необходимом тепловложении в изделие.

Выводы

1. Получены регрессионные уравнения для определения параметров наплавки пристеночного валика при многопроходной механизированной сварке в защитных газах.

2. Наиболее значимыми параметрами, влияющими на формирование пристеночного

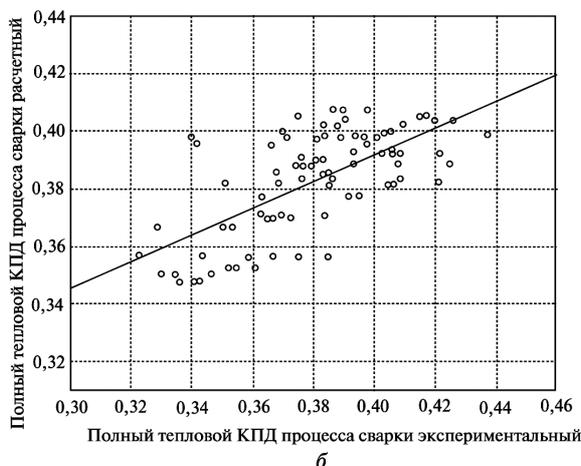
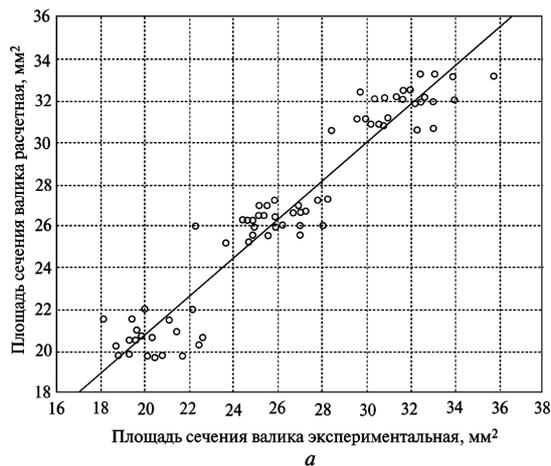


Рис. 4. Диаграмма рассеяния экспериментальных и расчетных значений площади сечения валика (а) и теплового КПД процесса сварки (б)

валика при заданных сварочном токе, напряжении и диаметре электрода являются положение электрода в разделке и скорость сварки. Смещение электрода к кромке повышает тепловложение в свариваемый металл, следовательно, увеличивает площадь сечения валика и полный тепловой КПД процесса сварки.

3. Повышение скорости сварки до определенного значения способствует увеличению глубины проплавления за счет уменьшения жидкой прослойки под дугой, следовательно, повышению полного теплового КПД процесса сварки.

Литература

1. Cerjak H. Mathematical Modelling of Weld Phenomena as a Tool of Modern Welding Technology // *Welding International*. 2001. Vol. 15. No. 8. P. 637–644.
2. Сас А.В., Гладков Э.А. Технологический процесс сварки как объект в АСУ // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 1983. № 8. С. 144–146.
3. Murugan S., Kumar P.V., Raj B., Bose M.S.C. Temperature distribution during multipass welding of plates // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1998. Vol. 75. No. 12. P. 891–905.
4. Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: В 3 т. Т. 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. 601 с.
5. Чернышов Г.Г., Панков В.В., Маркушевич И.С. Влияние параметров режима на формирование пристеночного валика при сварке в глубокую разделку // *Сварочное производство*. 1984. № 12. С. 14–16.
6. Рахматуллин Т.А., Шолохов М.А., Бузорина Д.С. Проблемы внедрения зауженных разделок при сварке корпусных конструкций специальной техники // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2012. № 4. С. 64–66.
7. Cho S.-H., Kim J.-W. Thermal analysis of horizontal fillet joints by considering bead shape in gas metal arc welding // *Science and Technology of Welding & Joining*. 2001. Vol. 6. No. 4. P. 220–224.
8. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
9. Шолохов М.А., Оськин И.Э., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Распределение тепловой мощности дуги при сварке плавящимся электродом в шелевую разделку // *Сварка и Диагностика*. 2012. № 4. С. 18–23.
10. Королев Н.В. Расчеты тепловых процессов при сварке, наплавке и термической резке. Екатеринбург: УГТУ, 1996. 156 с.

11. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов, В.М. Неровный, А.С. Куркин и др. / Под ред. В.М. Неровного. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 752 с.

References

1. Cerjak H. Mathematical Modelling of Weld Phenomena as a Tool of Modern Welding Technology. *Welding International*. 2001, vol. 15, no. 8, pp. 637–644.
2. Sas A.V., Gladkov E.A. Tekhnologicheskii protsess svarki kak ob"ekt v ASU [Welding procedure as an object in ACS]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 1983, no. 8, pp. 144–146.
3. Murugan S., Kumar P.V., Raj B., Bose M.S.C. Temperature distribution during multipass welding of plates. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 1998, vol. 75, no. 12, pp. 891–905.
4. Berезovskii B.M. *Matematicheskie modeli dugovoi svarki* [Mathematical models of arc welding]. In 3 vol. Vol. 2. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiia formirovaniia razlichnykh tipov svarynykh shvov* [Mathematical modeling and optimization of the formation of different types of welds]. Cheliabinsk, SUSU publ., 2003. 601 p.
5. Chernyshov G.G., Pankov V.V., Markushevich I.S. Vliianie parametrov rezhima na formirovanie pristenochnogo valika pri svarke v glubokuiu razdelku [The influence of mode parameters on the formation of the parietal roller when welding in a deep butchering]. *Svarochnoe Proizvodstvo* [Welding International]. 1984, no. 12, pp. 14–16.
6. Rakhmatullin T.A., Sholokhov M.A., Buzorina D.S. Problemy vnedreniia zauzhennykh razdelok pri svarke korpusnykh konstruktсии spetsial'noi tekhniki [Problems of narrow gaps welding of special engineering constructions]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2012, no. 4, pp. 64–66.
7. Cho S.-H., Kim J.-W. Thermal analysis of horizontal fillet joints by considering bead shape in gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding & Joining*. 2001, vol. 6, no. 4. pp. 220–224.
8. Erokhin A.A. *Osnovy svarki plavleniem. Fiziko-khimicheskie zakonomernosti* [Fundamentals of fusion welding. Physical and chemical laws]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1973. 448 p.
9. Sholokhov M.A., Os'kin I.E., Erofeev V.A., Poloskov S.I. Raspreделение teplovoi moshchnosti dugi pri svarke plaviashchimsia elektrodom v shchelevuiu razdelku [Arc Heat Power Distribution under Arc Narrow Groove Consumable Electrode Welding]. *Svarka i Diagnostika* [Welding and Diagnostics]. 2012, no. 4, pp. 18–23.
10. Korolev N.V. *Raschetny teplovykh protsessov pri svarke, naplavke i termicheskoi rezke* [Calculations of thermal processes in welding, thermal cutting and surfacing]. Ekaterinburg, UGTU publ., 1996. 156 p.
11. Konovalov A.V., Nerovnyi V.M., Kurkin A.S., Makarov Je.L. *Teoriia svarochnykh protsessov* [The theory of welding processes]. Moscow, Bauman Press, 2007. 752 p.

Статья поступила в редакцию 28.05.2013

Информация об авторах

БУЗОРИНА Дарья Сергеевна (Верхняя Пышма) — инженер ООО «ШТОРМ» (624093, Верхняя Пышма, Свердловская обл., Российская Федерация, Бажова ул., д. 28, e-mail: darja.buzorina@yandex.ru).

ШОЛОХОВ Михаил Александрович (Верхняя Пышма) — кандидат технических наук, директор ООО «ШТОРМ» (624093, Верхняя Пышма, Свердловская обл., Российская Федерация, Бажова ул., д. 28).

Information about the authors

BUZORINA Dar'ya Sergeevna (Upper Pyshma) — Engineer of LLC «STORM» (Bazhova, 28, 624093, Upper Pyshma, Sverdlovsk region, Russian Federation, e-mail: darja.buzorina@yandex.ru).

SHOLOKHOV Mikhail Aleksandrovich (Upper Pyshma) — Cand. Sc. (Eng.), Director of LLC «STORM» (Bazhova, 28, 624093, Upper Pyshma, Sverdlovsk region, Russian Federation).