



УДК 621.791.13

Моделирование режима протекания процесса сварки плоских листовых деталей взрывом

М.А.МАРИНИН , С.В.ХОХЛОВ, В.А.ИШЕЙСКИЙ 

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Перечень материалов, подлежащих сварке взрывом, весьма обширен и составляет несколько сотен сочетаний различных сплавов и металлов, а многообразие схем сварки взрывом насчитывает более тысячи вариантов. Практически во всех технических решениях процесс предусматривает последовательное создание физического контакта свариваемых материалов и их соединение за счет пластической деформации контактирующих поверхностей. Прочность такого соединения зависит от режима протекания процесса сварки. При правильном подборе параметров режима возможно получить качественное соединение требуемой прочности, однако экспериментальный подбор таких вариантов является весьма трудоемким и затратным процессом.

Компьютерное моделирование и применение математических моделей для решения динамических задач механики взрыва упрощает поиск оптимальных параметров и позволяет в кратчайшие сроки прогнозировать ожидаемый результат. В статье рассмотрены вопросы моделирования сварки металлов взрывом, расчеты, связанные с параметрами процесса образования сварного шва посредством программного пакета Ansys Autodyn. Представлена модель для анализа деформационного процесса сварки взрывом пластины и ее соединения с матрицей. Определены основные параметры сварки взрывом (скорость, давление, время). Адекватность получаемых значений оценивалась в системах алюминий – медь, медь – сталь. Выполнен сравнительный анализ результатов моделирования и натурных экспериментов.

На основе численных расчетов обоснован вывод о пригодности полученной модели для предварительного анализа основных параметров сварки на подготовительном этапе.

Ключевые слова: математическое моделирование; динамические процессы; деформационные процессы; сварка металлов взрывом; режим протекания процесса сварки

Как цитировать эту статью: Маринин М.А. Моделирование режима протекания процесса сварки плоских листовых деталей взрывом / М.А.Маринин, С.В.Хохлов, В.А.Ишейский // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 275-280. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.275

Введение. Алюминий и медь – два металла, часто используемые в автомобильной, оборонной и аэрокосмической промышленности благодаря высокой проводимости и податливости в обработке. Чаще всего биметаллические соединения выигрывают в весе, обеспечивая требуемую прочность. Экспериментальный подбор параметров протекания процесса сварки для получения качественной картины таких соединений с определенным набором параметров – весьма дорогостоящий и трудоемкий процесс.

Компьютерное моделирование и применение математических моделей для решения динамических задач механики взрыва весьма упрощает поиск ответов на теоретические и практические задачи взрывного дела. При выборе параметров технологического процесса сварки металлов взрывом привлечение математического моделирования ведет к сокращению экономических затрат и временных ресурсов на поисковой стадии. Предварительный прогноз физического результата дает возможность выбрать обоснованный режим протекания процесса для достижения требуемого результата. Изменяя угол установки детали, величину первоначального зазора, скорость детонации взрывчатого вещества (ВВ), представляется возможным промоделировать несколько сценариев и получить параметры скорости соударения, скорости перемещения точек соударения и т.д.

В основу математической модели и расчетных зависимостей для определения параметров ударно-волнового нагружения заложены уравнения и расчет, представленные в работах [6, 8]. Кинематические и термомеханические параметры процесса взяты из работ [1, 8], в которых рассматриваются физические аспекты сварки металла взрывом.

Представленные в работах [1, 8] модели и зависимости имеют ряд ограничений. В работе [8] рассматриваемый заряд и пластина без конечной длины, это допущение не учитывает сложность протекания волновых процессов на краях модели и, как следствие, дает неполную картину образования сварного шва на крайних кромках метаемой пластины. В работе [1] приведены зависимости, описывающие сложное поведение взрывчатого вещества с рядом допущений, в результате чего наблюдается неоднородность скорости детонации в заряде ВВ. Кроме того, не все модели

учитывают области неустойчивости течений, которые, в свою очередь, являются причиной образования волновой картины поверхности сварного шва [6].

Моделирование процесса сварки композитных материалов взрывом. Существует большое количество программного обеспечения, позволяющего повысить точность решения динамических нестационарных задач. Математический аппарат, заложенный в их основу, позволяет использовать сложные расчетные модели, в которых задаются как граничные условия, так и условия сходимости для определяющих параметров протекающего процесса. К такому программному обеспечению относится универсальная система конечно-элементного (МКЭ) анализа Ansys с пакетами Autodyn и LS-Dyna. Эти пакеты предназначены для явного динамического анализа, моделирования высоконелинейной динамики твердых тел, жидкостей, газов и их взаимодействия [4, 11].

При решении задачи моделировании процесса сварки композитных материалов взрывом основной целью являлась проверка адекватности полученных значений скоростей метания и параметров соударения метаемых пластин. Применимость предлагаемой модели оценивалась путем сопоставления расчетных значений с результатами расчета по существующим теоретическим зависимостям и их корреляцией с результатами модельных экспериментов.

В работе [6] решен ряд задач о распространении плоской детонационной волны в двумерной постановке. Для смесевых ВВ была использована модель Уилкинса – Гейроуха [11]. В качестве уравнения состояния выбрано уравнение Джонса – Уилкинса – Ли [12]. Расчет произведен с применением пакета LS-Dyna. Сопоставление значений давления на фронте ударной волны показало их удовлетворительную сходимость [3].

Постановка задачи. Зарядом аммонита 6 ЖВ с аммиачной селитрой толщиной 15 мм с соотношением компонентов 1:1 осуществляется метание пластины толщиной 2 мм. Начало детонации точечное, детонатор расположен по левому краю в центре левой кромки заряда. При описании поведения взрывчатого вещества была выбрана модель Уилкинса – Гейроуха [11]. В качестве уравнения состояния принята модель Джона – Уилкинса – Ли [11, 12]. Для описания поведения металлической пластины при динамической нагрузке принята модель Джонсона – Кука [9] и уравнение состояния Ми – Грюнайзена [14]. Решение задачи производилось с использованием многокомпонентного метода Лагранжа – Эйлера в плоской постановке. При расчете использовалась конечно-элементная сетка, состоящая из 31 212 узлов и 15 600 элементов. Максимальный размер элемента не превышал 0,1 мм. Расчет произведен с применением пакета Autodyn.

На рис.1 представлено положение метаемой пластины в процессе распространения фронта детонации и распределение скоростей продуктов взрыва, основные параметры соударения пластин: v_0 – скорость соударения пластины, v_k – скорость точки контакта, β – угол соударения.

Обсуждение результатов. В результате расчета были получены графики распределения давления от времени (рис.2, а) и скоростей точек метаемой пластины по удалению от точки начала детонации (рис.2, б). Первая точка расположена на расстоянии 15 мм от левого края на нижней границе метаемой пластины, вторая и третья точки на расстояниях 30 и 40 мм.

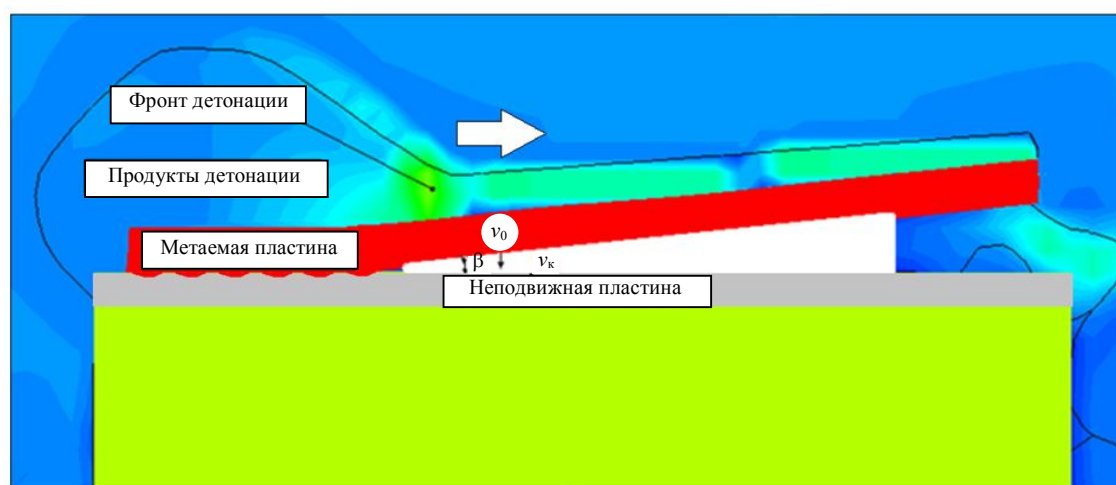


Рис.1. Положение метаемой пластины в процессе распространения фронта детонации

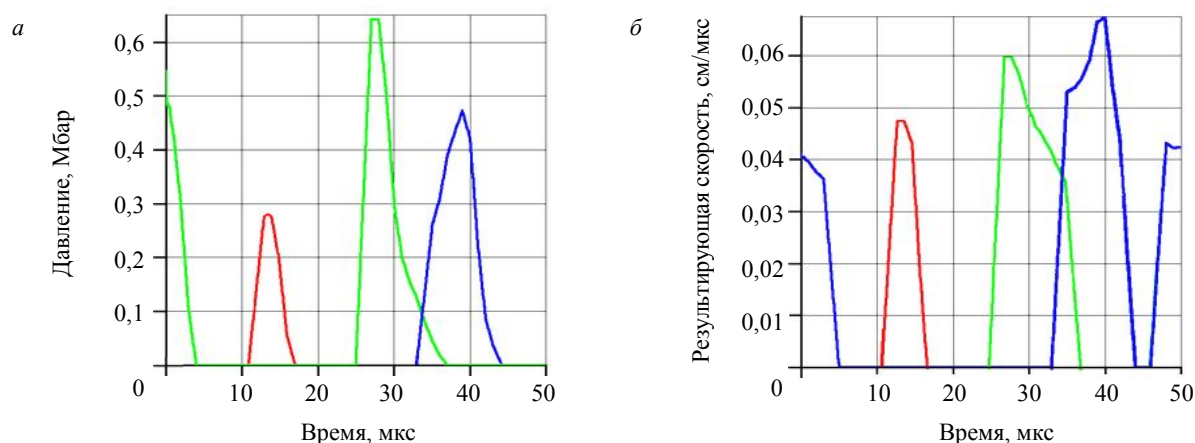


Рис.2. Графики распределения, полученные в результате расчета модели для давления от времени (а); скоростей точек метаемой пластины по удалению от точки начала детонации (б)

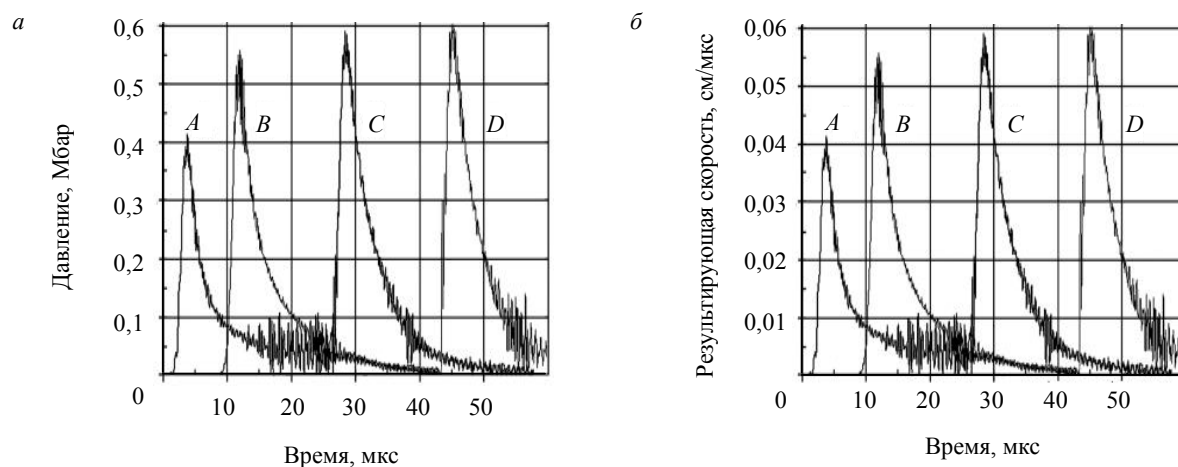


Рис.3. Графики распределения по результатам работы [3] для давления от времени (а); скоростей точек метаемой пластины по удалению от точки начала детонации (б); A, B, C, D – расстояние от торца, равное 5; 20; 50; 80 мм

На основе экспериментальных данных распределения давления от времени (рис.3, а) и скоростей (рис.3, б) [3] был проведен сравнительный анализ полученных результатов. Можно сделать вывод о наличии непродолжительного участка, на котором значение угла соударения метаемой пластины приближается к асимптотическому значению. Протяженность участка составляет 45-50 мм. Наблюдается колебательный процесс в соударяющихся пластинах за фронтом ударной волны. В табл.1 приведены значения скоростей метания и угла соударения, полученные в результате моделирования, данных работы [3] вместе с результатами расчета по теоретической методике [8], в которой угол соударения определялся из выражения

$$\beta = \frac{0,992r}{r + 2,71 + \frac{0,194}{y}}, \quad (1)$$

где $r = \frac{\rho_0 h_0}{\rho_1 h_1}$ – безразмерный коэффициент; ρ_0 – плотность ВВ; ρ_1 – плотность материала пластины; y – зазор между метаемой пластиной и основанием; h_0 – толщина заряда; h_1 – толщина метаемой пластины.

При теоретических расчетах скоростей соударения для большинства металлов зависимость Уиттмана дает значительно заниженные результаты скоростей при сварке алюминиевых сплавов и не применяется на практике. В работе [10] была предложена зависимость, в большинстве случаев дающая завышенный результат. В частных случаях завышение значений скоростей достигает 30-40 % по сравнению с фактическими экспериментальными значениями.

Таблица 1

Значения показателей угла соударения и скоростей метания пластин

Материал	Угол соударения, град.			Скорость метания, м/с		
	Расчет	Данные работы [5]	Моделирование	Расчет	Данные работы [5]	Моделирование
Алюминий	16°30'	15°30'-17°20'	16°00'-17°30'	575	540-600	520-640
Медь	8°15'	7°45'-8°40'	7°30'-8°30°	280	270-300	250-310
Сталь	9°20'	8°40'-10°35'	9°10'-10°20'	310	305-370	305-340

Более точный результат дает зависимость, предложенная в работе [14], однако, она имеет критическое допущение. При больших разностях прочности свариваемых металлов на значение скорости влияет прочность более твердого металла. Оптимальное значение скорости в таком случае повышается. Поэтому для сравнения была выбрана расчетная зависимость, позволяющая учесть скорость детонации применяемого ВВ. Скорость соударения рассчитана из выражения [8]:

$$v_0 = 2D \sin\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad (2)$$

где D – скорость детонации ВВ; β – угол соударения метаемой пластины.

Расчетные значений скоростей метания и углов соударения пластины, результаты моделирования и данные, полученные в работе [3], сведены в табл.1.

Расхождение между значениями углов соударения метаемой пластины для разных материалов, рассчитанных по зависимостям (1) и (2), данными работы [3] и результатами моделирования не превышает 10 %. Расчет был выполнен при малых значениях фактора релаксации, что обеспечило высокую сходимость с теоретическими и экспериментальными данными. Основываясь на результатах расчета и их корреляции с экспериментальными результатами [5, 10], можно сделать вывод об адекватности модели и ее применимости для расчета показателей угла соударения.

Расхождение значений расчета скоростей метания по сравнению с теоретическими расчетами составило 25 %. При сгущении расчетной сети и уменьшении шага итераций представляется возможным уменьшить погрешность полученных результатов. При сравнении с результатами работы [3] расхождение достигает 10 %, что является удовлетворительным результатом.

Разработанная модель позволяет произвести качественную оценку будущего сварного шва. На рис.4 приведен срез композитного соединения медь – сталь на алюминиевой подложке, полученный в результате сварки металлов взрывом [9, 13]. Прослеживается четкая волнообразная линия и наплыв свариваемых металлов как при эксперименте, так и в модели. Для оценки адекватности модели прогнозируемая картина сварного шва может быть оценена по параметрам амплитуды и длины волны натекания, формируемой при соударении (рис.5). Оценка прогнозируемого результата сварки произведена при значениях скоростей метания и углов соударения, представленных в табл.1.

Анализ полученных результатов (табл.2, рис.5) свидетельствует об удовлетворительной картине и адекватности качественного процесса формирования шва. Расхождение значений длин волн для системы медь – сталь варьируется от 5 до 15 % по сравнению с результатами работы [8] и от 5 до 10 % по сравнению с результатами работы [3]. Для системы алюминий – медь расхождение варьируется в пределах от 10 до 20 % [8] и от 5 до 10 % [3, 7]. Расхождение значений амплитуды волны не превышает 10 %. Полученные показатели свидетельствуют о том, что результаты моделирования могут быть применимы для прогнозирования зоны структурообразования на границе контакта свариваемых металлов и предварительной оценки качественной картины прогнозируемого шва.

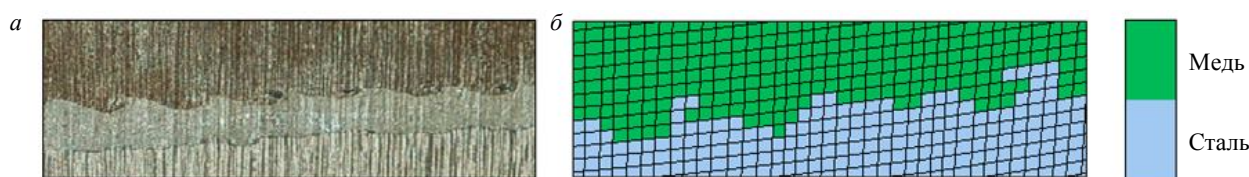


Рис.4. Микроструктура соединения медь – сталь: а – натурный эксперимент [13]; б – расчетная модель

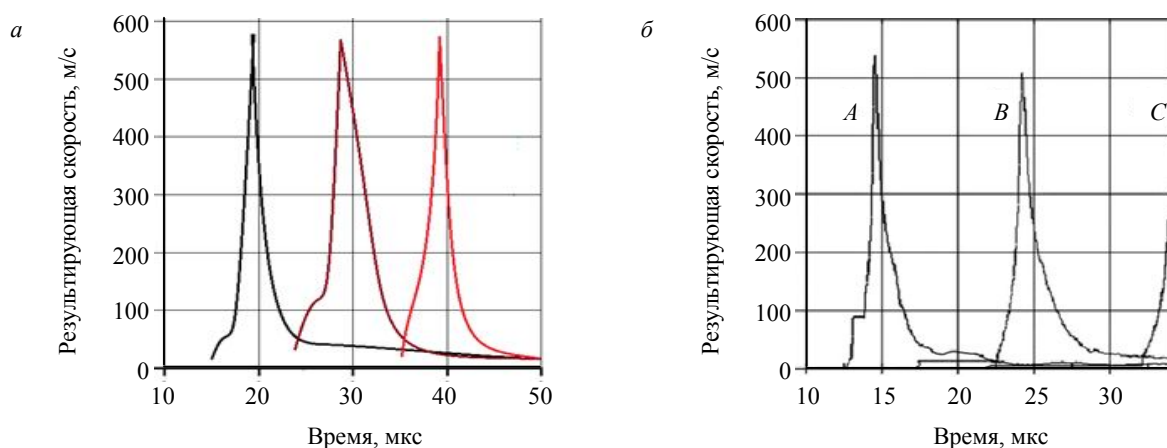


Рис.5. Графики зависимостей скорости в характерных точках от времени: *a* – расчет по модели; *б* – расчет по данным работы [3]; *A, B, C* – расстояние от торца 5, 20, 50 мм

Таблица 2

Параметры формируемой структуры шва

Параметры	Медь – сталь			Алюминий – медь		
	Расчет	Данные работы [5]	Моделирование	Расчет	Данные работы [5]	Моделирование
Длина волны, мкм	240	250-280	230-260	200	230-250	240-270
Удвоенная амплитуда, мкм	70-80	80-90	70-85	80	70-80	70-85

Выводы. С целью изучения и поиска параметров процесса сварки металлов взрывом была проведена серия вычислительных экспериментов, основой которых являлись анализ, интерпретация и сопоставление результатов компьютерного моделирования с реальными результатами.

На основе результатов исследования кинетики соударения элементов пластины с заготовкой при сварке взрывом в системах алюминий – медь, медь – сталь разработана концептуальная модель проектирования оптимальных технологических процессов сварки взрывом с привлечением программного пакета Autodyn, на его основе созданы тестовые задачи, решение которых дало удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными. Представленная модель позволяет более точно оценивать параметры соударения на начальном участке разгона, производить расчет скоростей соударения и оптимальных параметров режима сварки взрывом с целью обеспечения качественной реализации сварного соединения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волнообразование при косых соударениях: Сборник статей / Под ред. И.В.Яковлева. Новосибирск: Изд-во Института дискретной математики и информатики, 2000. 221 с.
2. Математическое моделирование деформационного и взрывного процессов, происходящих при сварке взрывом / И.В.Денисов, А.Е.Розен, Д.Б.Крюков и др. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2006. № 9(24). Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений». Вып. 2. С. 79-87.
3. Моделирование деформационного процесса в задачах армирования и сварки взрывом с применением программы LS-DYNA / А.Е.Розен, И.С.Лось, А.Ю.Муйземнек, А.В.Хорин, Е.А.Журавлев // Технические науки. Машиностроение и машиноведение. 2010. № 1 (13). С. 123-132.
4. Муйземнек А.Ю. Математическое моделирование процессов, удара и взрыва в программе LS-DYNA / А.Ю.Муйземнек, А.А.Богач. Пенза: Информационно-издательский центр ПензГУ, 2005. 106 с.
5. Особенности микроструктуры и механизмы формирования субмикроструктурной меди, полученной методами интенсивной пластической деформации / А.Н.Тюменцев, И.А.Дитенберг, Ю.П.Пинжин и др. // Физика металлов и металловедение. 2003. № 4 (96). С. 33-43.
6. Пшеничник А.И. Модель сверхпластичности, основанная на представлениях о кооперативном зернограницном проскальзывании / А.И.Пшеничник, О.А.Кайбышев, В.В.Астанин // Математическое моделирование систем и процессов. 1998. № 6. С. 99-109.
7. Сварка взрывом на тонких зазорах: особенности и перспективы применения насыпных взрывчатых веществ / В.В.Гундорин, Е.И.Ермолович, И.А.Кузнецов, А.С.Смирнов, В.Б.Яшин // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 19. С. 48-52.



8. Физика взрыва: В 2-х т. / Под ред. Л.П.Орленко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. Т. 2. 656 с.
9. *Kuzkin V.A.* Application of numerical simulation for identification of Johnson-Cook material model parameters for aluminum under high-speed loading / V.A.Kuzkin, D.S.Mihaluk // *Computational Continuum Mechanics*. 2010. Vol. 3. P. 32-43.
10. *Kaya Y.* Investigation of copper-aluminum composite materials produced by explosive welding // *Metals*. 2018. Vol. 8. № 780.
11. LS-DYNA: Theoretical Manual / Editor J.Hallquist. Livermore, LSTC, 1998. 628 p.
12. One parameter-obtained method for JWL equation of state considered detonation parameters / Y.Nan, J.Jiang, S.Wang, J.Men // *Explosion and Shock Waves*. 2015. Vol. 35(2). P. 157-163.
13. Shock-Assisted Materials Synthesis and Processing: Science, Innovations and Industrial Implementation / Edited A.A.Deribas, Yu.B.Scheck. Moscow: Torus Press Ltd., 2008. 152 p.
14. *Shyue K.M.* A Fluid-Mixture Type Algorithm for Compressible Multicomponent Flow with Mie-Gruneisen Equation of State // *Journal of Computational Physics*. 2001. Vol. 171. P. 678-707.

Авторы: **М.А.Маринин**, канд. техн. наук, доцент, marinin_ma@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **С.В.Хохлов**, канд. техн. наук, доцент, khokhlov_sv@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), **В.А.Ишейский**, канд. техн. наук, доцент, isheyskiy_va@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 15.06.2018.

Статья принята к публикации 20.12.2018.