

*Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев, А.А. Усольцев, А.О. Патрушев, П.Е. Шишкин*

Сибирский государственный индустриальный университет

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ РЕЛЬСОВ

В настоящее время на железных дорогах осуществляется переход на бесстыковую конструкцию пути. Развитие технологий, позволяющих обеспечить возможность получения бесстыкового железнодорожного пути с требуемыми характеристиками качества, на сегодняшний день является актуальным направлением [1 – 6].

Для сварки рельсов наибольшее распространение получил электроконтактный способ (ЭС), который применяют более чем в 95 % случаев. В Российской Федерации на железнодорожном транспорте применяют только ЭС, которым ежегодно выполняют порядка 600 тыс. стыков рельсов на рельсосварочных предприятиях (РСП) и до 50 тыс. стыков путевыми рельсосварочными самоходными машинами (ПРСМ) [7].

При электроконтактном способе торцы свариваемых рельсов нагреваются теплом, выделенном в контакте между рельсами при пропускании через них тока. Напряжение подается к свариваемым рельсам от сварочных трансформаторов рельсосварочной машины, рельсы перемещаются навстречу друг другу. При соприкосновении торцов возникают единичные контакты, так как касание их происходит не по всей площади рельса, а по микронеровностям. Образующиеся контакты быстро нагреваются и взрываются. Поскольку торцы перемещаются навстречу друг другу, то вместо взорвавшихся контактов образуются новые. Сопротивление каждого элемента и плотность тока, протекающего через него, велики, поэтому контакты нагреваются очень быстро. В местах соприкосновения металл расплавляется и взрывается раньше, чем площадь контакта успеет значительно увеличиться в процессе сближения торцов рельсов. После взрыва элементарных контактов на их месте образуются углубления – кратеры. Новые контакты возникают на месте кратеров лишь через некоторое время, которое определяется скоростью подачи свариваемых рельсов и первоначальной глубиной кратера. В любой момент времени (за исключением моментов замыкания рель-

сов) общая площадь всех контактов значительно меньше площади сечения оплавливаемых деталей. За время существования элементарных контактов участки торцов рельсов, прилегающие к контактам, нагреваются до высоких температур. Часть расплавленного металла при взрыве перемычек выбрасывается наружу в виде брызг, в кратерах остаются узкий слой нагретого, но нерасплавленного металла, и пленка жидкого металла, оставшегося после взрыва [8].

Технологический процесс сварки рельсов электроконтактным способом обычно разделен на несколько этапов: *I* – оплавление, *II* – оплавление, *III* – форсировка, *IV* – осадка, *V* – гратосъем. Первый этап заключается в разогреве контактных поверхностей. Задача второго этапа – добиться равномерного оплавления (жидкого слоя металла) на торцах рельсов. Третий этап – форсировка, заключается в ускоренном движении подвижной станины, что обеспечивает лучшую защиту искрового зазора. Четвертый этап – осадка – торцы быстро сближаются с большим усилием. При этом жидкий металл с оксидными пленками выдавливается из стыка наружу и при затвердевании образует грат, который удаляют в горячем виде на пятом этапе – гратосъеме. Каждый этап характеризуется режимами сварки: силой тока  $I$ , А; напряжением  $U$ , В; величиной перемещения подвижной станины  $S$ , мм; давлением в системе  $P$ , Па; скоростью перемещения подвижной станины  $V$ , мм/с; длительностью этапа  $T$ , с.

В настоящей работе проводили исследование по оптимизации процесса контактной сварки рельсов типа Р65 на машине К1100. Для вышеописанных этапов при сварке на этой машине обычно используют значения основных параметров, приведенных в таблице.

Весь процесс сварки полнопрофильных рельсов контролировался с записью основных параметров в память компьютера аналогичного компьютерного управления, используемого в работе [9]. Отслеживание параметров велось по трем значениям: минимум, максимум и среднее. Эти параметры во время процесса

## Интервалы значений основных параметров

№ п/п	Этап	Интервалы значений параметров сварки					
		$T, c$	$I, A$	$U, B$	$P \cdot 10^{-5}, Па$	$V, мм/с$	$S, мм$
1	<i>I</i> – оплавление	28 – 46	7 – 1088	335 – 440	27 – 42	0,00 – 0,67	4,4 – 5,4
2	<i>II</i> – оплавление	60 – 100	24 – 736	148 – 424	26 – 35	0,22 – 0,89	7,0
3	<i>III</i> – форсировка	4,2 – 6,1	110 – 788	280 – 443	27 – 33	1,33 – 1,89	6,5
4	<i>IV</i> – осадка	1,1 – 3,0	6 – 1174	2 – 423	25 – 129	1,56 – 9,33	17,8 – 18,6
5	<i>V</i> – гратосъем	1,0	2 – 324	1 – 105	71 – 129	0,11 – 0,56	0,1 – 1,0

сварки фиксировались и сохранялись в базе данных в табличном виде и при необходимости в графическом виде (рис. 1).

Технология сварки рельсов на РСР включает в себя обязательную сварку контрольных образцов в начале рабочей смены. Свариваются по два образца на каждую сварочную машину, после чего проводят испытание нетермообработанных стыков на трехточечный статический изгиб согласно СТО РЖД 1.08.002 – 2009 «Рельсы железнодорожные, сваренные электроконтактным способом». Испытания на статический изгиб проводят на прессе типа ПМС-320.

Контрольные образцы испытывались после сварки и удаления грата в сварочной машине без дополнительной обработки стыков. При испытаниях на статический поперечный изгиб контрольный образец имел длину не менее 1200 мм со сварным стыком посередине. Нагрузку прикладывали в середине пролета контрольного образца в месте сварного стыка с расстоянием между опорами 1 м (рис. 2).

Испытание одного контрольного образца проводят с приложением нагрузки на головку (растяжение в подошве), второй контрольный

образец нагружают на подошву (растяжение в головке). Результатами испытания являются значения усилия, возникающего при изгибе  $P_{изг}$ , кН, и значения стрелы прогиба  $f_{пр}$ , мм, при которых происходит разрушение контрольного образца, либо максимальные значения этих показателей, если образец не разрушился во время испытаний. На рис. 3 представлен график процесса испытания рельсовых стыков. Далее фактические показатели сравнивают с нормативными. Если образец выдержал нормативные требования, начинается сварка рельсов в плеть. В случае, если образец не выдержал нормативных требований, производят повторную сварку. Если же повторные испытания также имеют не удовлетворительный исход, предпринимаются действия по поиску причин низких показателей и корректировке технологических режимов.

Каждый технологический этап имеет свою продолжительность, внутри этого этапа контролируемые параметры изменяются в широком диапазоне (рис. 1). Для описания процесса контактной сварки рельсов в настоящей работе применяли метод статистического моделирования. Для его реализации необходимо уста-

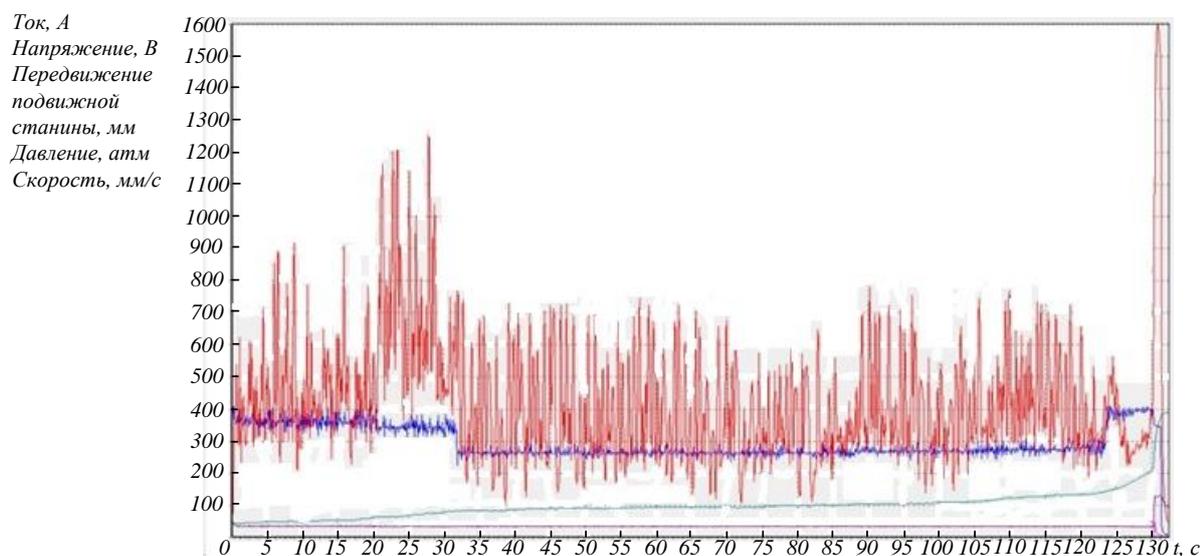


Рис. 1. Оциллограмма процесса сварки



Рис. 2. Схема испытания на статический поперечный изгиб

новление независимых (входных) переменных, а также выявление зависимых (выходных) параметров. Для создания математической модели процесса контактной сварки рельсов использовалась имеющаяся база данных параметров сварочных режимов и результатов испытаний сварных соединений. В результате предварительного анализа параметров процесса контактной сварки рельсов установлены независимые (входные) переменные и зависимые (выходные) параметры. Независимые (входные) переменные, такие как  $I$ ,  $U$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $V$ , являются параметрами сварочного режима, влияющими на качество сварного шва рельсов. В качестве зависимых (выходных) параметров выбраны величина усилия, возникающего при изгибе  $P_{изг}$ , кН, и значение стрелы прогиба  $f_{пр}$ , мм, при которых происходит разрушение контрольного образца.

После обработки данных производственного контроля и параметров сварочных режимов были получены таблицы для каждого этапа, в которых приведены основные фактические значения сварочных режимов на машине контактной стыковой сварки К1100 и результатов испытаний сварных соединений, состоящие из 80 наблюдений.

На основе полученных производственных данных была проведена их статистическая обработка с использованием пакета STATISTICA 6.0. Оценка влияния параметров сварочных режимов на величину усилия  $P_{изг}$  и значение  $f_{пр}$  проводилась средствами многофакторного корреляционного анализа, который позволяет изучить закономерности изменения результирующего показателя в зависимости от поведения различных факторов [10, 11].

Вычисление коэффициентов регрессионных уравнений проводили матричным методом с использованием пакета STATISTICA 6.0. Уравнение регрессии представлено в следующем виде:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n, \quad (1)$$

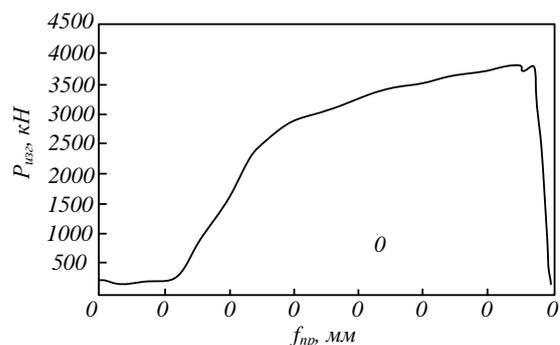


Рис. 3. График процесса испытания рельсовых стыков

где  $Y$  – зависимый (выходной) параметр;  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – независимые (входные) переменные;  $B_0, B_1, B_2, \dots, B_n$  – коэффициенты регрессии.

На каждом технологическом этапе сварки были построены регрессионные модели с выходными параметрами  $P_{изг}$  и  $f_{пр}$  и рассчитаны коэффициенты детерминации:

– модели на первом этапе оплавления

$$P_{изг} = 5129,96 + 49,02 V_{ср} + 9,63 V_{мин} + 12,54 V_{макс} - 10,14 S_{прип} - 3,92 S_{поз} - 51,61 P_{ср} + 6,82 P_{мин} + 19,54 P_{макс} + 8,59 U_{ср} - 7,95 U_{мин} - 2,69 U_{макс} - 3,72 I_{ср} + 1,51 I_{мин} - 1,21 I_{макс} - 2,24 T_{длит};$$

$$R^2 = 0,24; \quad (1.1)$$

$$f_{пр} = -100,44 + 3,22 V_{ср} + 1,01 S_{поз} - 2,96 P_{мин} - 0,61 P_{макс} + 0,55 U_{ср} - 0,35 U_{макс} + 0,08 I_{ср} + 0,10 I_{макс};$$

$$R^2 = 0,50; \quad (1.2)$$

– модели на втором этапе оплавления

$$P_{изг} = 11497,07 + 57,11 V_{ср} + 178,46 V_{мин} - 86,14 V_{макс} - 6,99 S_{прип} - 2,12 S_{поз} - 119,85 P_{ср} - 69,42 P_{мин} - 21,97 P_{макс} - 11,16 U_{ср} + 0,45 U_{мин} - 0,49 U_{макс} + 2,40 I_{ср} + 5,24 I_{мин} + 1,70 I_{макс} - 0,22 T_{длит} - 1,39 T_{нач};$$

$$R^2 = 0,20; \quad (2.1)$$

$$f_{пр} = -436,24 + 1,92 V_{ср} + 7,94 V_{мин} - 0,49 V_{макс} + 5,92 S_{прип} + 0,332 S_{поз} - 0,03 P_{ср} - 0,24 P_{мин} - 4,47 P_{макс} + 0,56 U_{ср} + 0,07 U_{мин} - 0,11 U_{макс} + 0,22 I_{ср} - 0,05 I_{мин} - 0,02 I_{макс} - 0,03 T_{длит};$$

$$R^2 = 0,27; \quad (2.2)$$

– модели на этапе форсировки

$$P_{изг} = 5792,22 + 159,64 V_{ср} + 60,29 V_{мин} + 33,69 V_{макс} + 4,72 S_{прип} - 15,53 S_{поз} + 52,83 P_{ср} - 130,84 P_{мин} + 55,38 P_{макс} - 11,82 U_{ср} + 0,15 U_{мин} + 11,43 U_{макс} - 4,71 I_{ср} - 0,35 I_{мин} - 0,29 I_{макс} + 14,28 T_{длит} - 0,29 T_{нач};$$

$$R^2 = 0,15; \quad (3.1)$$

$$f_{пр} = -5,95 - 4,68 V_{ср} + 4,30 V_{мин} + 1,47 V_{макс} + 1,90 S_{прип} - 0,37 S_{поз} + 0,82 P_{ср} - 2,30 P_{мин} - 2,98 P_{макс} + 0,19 U_{ср} - 0,04 U_{мин} + 0,21 U_{макс} + 0,04 I_{ср} - 0,02 I_{мин} + 0,57 T_{длит};$$

$$R^2 = 0,20; \quad (3.2)$$

– модели на этапе осадки

$$P_{изг} = -1856,13 + 200,10 V_{ср} - 43,91 V_{мин} + 6,52 V_{макс} - 18,40 S_{прип} - 15,05 S_{поз} + 22,86 P_{ср} - 3,32 P_{мин} + 61,72 P_{макс} + 7,28 U_{ср} - 0,07 U_{мин} - 13,67 U_{макс} - 2,63 I_{ср} - 0,19 I_{мин} + 3,92 I_{макс} + 39,64 T_{длит} - 0,43 T_{нач}; R^2 = 0,24; \quad (4.1)$$

$$f_{пр} = -161,50 + 2,00 V_{ср} - 0,01 V_{мин} + 0,16 V_{макс} - 0,14 S_{прип} - 0,26 S_{поз} - 0,82 P_{ср} + 0,10 P_{мин} + 2,42 P_{макс} + 0,11 U_{ср} - 0,06 U_{макс} - 0,02 I_{ср} - 0,01 I_{мин} + 0,03 I_{макс} + 0,79 T_{длит} - 0,01 T_{нач}; R^2 = 0,15; \quad (4.2)$$

– модели на этапе гратосъема

$$P_{изг} = 2878,60 + 941,99 V_{ср} + 72,97 V_{макс} - 128,93 S_{прип} - 1,88 S_{поз} + 104,21 P_{ср} - 84,19 P_{мин} - 13,36 P_{макс} + 5,19 U_{ср} - 102,99 U_{мин} + 54,51 U_{макс} + 19,41 I_{ср} - 0,55 I_{мин} - 20,33 I_{макс} - 0,47 T_{нач}; R^2 = 0,36; \quad (5.1)$$

$$f_{пр} = 97,35 - 36,29 V_{ср} - 2,95 V_{макс} + 2,83 S_{прип} - 0,13 S_{поз} + 3,31 P_{ср} - 2,08 P_{мин} - 1,30 P_{макс} + 1,09 U_{ср} - 3,80 U_{мин} + 0,91 U_{макс} + 1,56 I_{ср} - 1,07 I_{мин} - 0,56 I_{макс}; R^2 = 0,18; \quad (5.2)$$

здесь  $T_{длит}$  – длительность этапа,  $T_{нач}$  – время начала этапа;  $S_{поз}$  – текущее положение подвижной станины.

Коэффициенты детерминации для каждой модели имеют низкие значения, это говорит о том, что входные переменные на каждом отдельном этапе процесса контактной сварки не в полной мере отражают полноту своего влияния на выходные параметры. Очевидно, что каждый из этапов оказывает влияние на выходные параметры, но полное влияние входных переменных можно оценить только в совокупности этих этапов.

Отбросив неудовлетворяющие параметры по  $t$ -критерию Стьюдента и собрав эти параметры каждого этапа в одном уравнении, получили следующие модели, описывающие весь процесс в целом:

$$P_{изг} = 814,08 - 12,93 I_{макс5} + 40,84 U_{макс5} - 0,64 T_{нач4} - 0,26 I_{мин4} + 3,20 I_{макс4} - 6,29 U_{макс4} - 2,12 P_{мин4} + 41,79 P_{макс4} + 53,33 V_{ср4} + 6,60 I_{ср1} - 219,91 P_{ср1}; R^2 = 0,79 \quad (6.1);$$

$$f_{пр} = -194,21 - 0,24 I_{макс5} - 0,02 T_{нач4} + 0,07 I_{макс4} + 2,43 P_{макс4} - 0,75 P_{ср4} + 1,94 V_{ср4} + 0,01 I_{макс3} + 0,05 T_{длит4} + 0,08 I_{ср1} - 3,32 P_{ср1}; R^2 = 0,71. \quad (6.2);$$

Полученные уравнения регрессии учитывают влияние каждого технологического этапа процесса контактной сварки рельсов на выходные свойства. Данные модели имеют достаточно высокие коэффициенты детерминации; по  $t$ -критерию Стьюдента коэффициенты регрессии всех входных переменных значимы; модель является адекватной по  $F$ -критерию

Фишера (для  $P_{изг}$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  имеем  $F_{факт} = 9,88 > F_{кр} = 0,38$ ; для  $f_{пр}$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  имеем  $F_{факт} = 6,90 > F_{кр} = 0,38$ ).

Адекватность уравнений регрессии (6.1), (6.2) проверялась по показателю средней ошибки аппроксимации [12]:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{Y_i} \right| \cdot 100,$$

где  $m$  – количество наблюдений;  $\tilde{Y}_i$  – вычисленное значение результирующего показателя;  $Y_i$  – фактическое значение результирующего показателя.

Для показателей  $P_{изг}$  и  $f_{пр}$  средняя ошибка аппроксимации составила 2,8 и 5 % соответственно.

Анализ распределения остатков показал, что явного отклонения от нормального закона распределения не наблюдается, т. е. остатки распределены случайно и в модели отсутствуют неучтенные параметры, влияющие на выходной параметр. Модель пригодна для принятия решений и для прогнозирования.

**Выводы.** На основании экспериментальных данных разработаны математические модели процесса контактной сварки рельсов на машине K1100, позволяющие оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварного шва. С помощью разработанных регрессионных моделей предложено прогнозировать качество сварного шва и управлять технологическими параметрами процесса контактной сварки рельсов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meade B. Railroad welding demands specialized processes // Welding journal. 1997. Vol. 76. № 9. P. 47 – 52.
2. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galai M.S. Effect of vibroimpact treatment on the physical and mechanical properties of the surface layer of welded joints in rails // Welding International. 2014. Vol. 28. № 3. P. 245 – 247.
3. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding // Welding International. 2014. Vol. 28. № 7. P. 510 – 520.

4. Karimine K., Uchino K., Okamura M. Susceptibility to and occurrence of HAZ liquation cracking in rail steels: Study of rail welding with high-C welding materials (4th Report) // *Welding International*. 1997. Vol. 11. № 6. P. 452 – 461.
5. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shvets V.I., Mikitin Ya. I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert // *Welding International*. 2008. Vol. 22. № 5. P. 338 – 341.
6. Irving, B., Long Island Rail Road orders an all-welded fleet // *Welding journal*. 1997. Vol. 22. № 9. P. 33 – 37.
7. Калашников Е.А., Королев Ю.А. Технологии сварки рельсов: тенденции в России и за рубежом // *Путь и путевое хозяйство*. 2015. № 8. С. 2 – 6.
8. Оборудование для контактной сварки рельсов и его эксплуатация / Под ред. С.А. Солодовникова и др. / Академия наук УССР. – Киев: Наукова думка, 1974. – 184 с.
9. Журавлев С.И., Сударкин А.Я., Сергеев Л.С., Королева А.Б. Технологические возможности оборудования для контактной стыковой сварки с компьютерным управлением // *Сварка и диагностика*. 2009. № 3. С. 51 – 57.
10. Анализ данных в материаловедении. Ч. 2. Регрессионный анализ: учеб. пособие / Под ред. А.С. Мельниченко. – М.: ИД МИСиС, 2014. – 87 с.
11. Куценко А.И., Черемушкина Е.М., Щеглов В.А., Усольцев А.А. Статистический анализ технологических процессов в среде STATISTICA и EXCEL: учеб. пособие. – Томск: изд. ТПУ, 2010. – 277 с.
12. Практикум по теории статистики: учеб. пособие / Под ред. Р.А. Шмойловой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 416 с.

© 2017 г. Р.А. Шевченко, Н.А. Козырев,  
А.А. Усольцев, А.О. Патрушев, П.Е. Шишкин  
Поступила 27 января 2017 г.

УДК 621.78.011:669.14

**О.А. Кондратова, В.Е. Громов, Е.В. Мартусевич, В.Б. Костерев, Ю.Ф. Иванов**

**Сибирский государственный индустриальный университет**

### **ПРИРОДА ФОРМИРОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФАЗ ПРИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ СТАЛИ\***

Ускоренное охлаждение проката в потоке станов при термомеханической обработке (ТМО) является эффективным способом получения металлопродукции из низкоуглеродистых сталей с высокими механическими свойствами [1 – 3].

Исследование процессов термомеханической обработки, включающей ускоренное охлаждение, должно устанавливать связи между механическими свойствами готового продукта и эволюцией структуры, фазового состава и дислокационной субструктуры для каждого конкретного изделия. Только в этом случае возможна разработка оптимальных режимов

упрочнения и целенаправленное управление эксплуатационными свойствами.

Деформация стали при термомеханической обработке, наряду с эволюцией дефектной подсистемы, практически всегда сопровождается фазовыми превращениями, которые протекают при интенсивном взаимодействии атомов углерода с дефектами кристаллической решетки [4 – 7]. В этих работах установлены количественные закономерности формирования структурно-фазовых состояний, механических и трибологических свойств при ускоренном охлаждении двутавровой балки в различных режимах, свидетельствующие о поверхностном упрочнении материала. Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии показано, что структура, фазо-

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-48-420530.