

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА, НАПЛАВЛЕННОГО ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ

Е. В. БЕРЕЖНАЯ¹, В. Д. КУЗНЕЦОВ¹, В. Д. КАССОВ², П. А. ГАВРИШ²

¹НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 37.

E-mail: elena.kassova07@gmail.com

²Донбасская государственная машиностроительная академия.

84313, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Академическая, 72

Поиск оптимизации структуры и свойств наплавленного металла деталей является актуальной задачей, решение которой позволяет повысить их эксплуатационные свойства и продлить рабочий ресурс. Данные исследований в этом направлении при использовании электроконтактной наплавки весьма ограничены. В работе установлено, что склонность наплавленного поверхностного слоя детали (наплавленный металл и ЗТВ) к микропластической деформации является важным фактором определения чувствительности металла к концентрации напряжений. Получена структура наплавленного металла, которая отличается низкой чувствительностью к концентрации напряжений. Показано, что повышение в структуре наплавленного слоя содержания цементита приводит к росту склонности к накоплению дислокаций в ходе микродеформаций, а наличие большого объема свободного феррита позволяет снизить интенсивность накопления дислокаций, уменьшая чувствительность наплавленного металла к концентрации напряжений. Библиогр. 11, табл. 2, рис. 5.

Ключевые слова: электроконтактная наплавка, структура поверхностного слоя, микродеформация, концентрация напряжений

Процесс электроконтактной наплавки компактными материалами (проволоками, лентами) осуществляется совместным деформированием привариваемого материала и поверхностного слоя детали, нагретых в зоне деформации короткими импульсами тока [1–3]. Перекрытие сварочных точек между собой достигается вращением детали со скоростью, пропорциональной частоте импульсов тока [4]. Таким образом, электроконтактную наплавку следует понимать как совокупность операций нагрева, деформации и охлаждения водой (при необходимости), в результате которых наплавленный слой характеризуется неоднородностью структуры и механических свойств, а также различной чувствительностью к концентрации напряжений [5].

Наличие в наплавленном слое неоднородной структуры, обусловленной спецификой процесса наплавки, приводит к снижению срока службы деталей, эксплуатирующихся в условиях циклических нагрузок [6]. Учитывая, что склонность металла наплавленного слоя к микропластической деформации является важным фактором чувствительности к концентрации напряжений [7], определение оптимальной структуры с точки зрения физического состояния поверхностных слоев (наплавленного слоя и ЗТВ) позволит правильно выбирать технологию восстановления изношенных деталей. Регламентирование комплекса показателей физико-механического характера (механи-

ческие свойства металла поверхностных слоев, микроструктура, остаточные напряжения с созданием благоприятного их распределения в поверхностном слое) является значительным резервом обеспечения надежности восстановленных деталей.

Целью работы является проведение исследований, направленных на выявление микроструктуры, характеризующейся малым сопротивлением микропластической деформации и низкой чувствительностью к концентрации напряжений применительно к выбранной группе восстанавливаемых и наплавочных материалов.

Исследование микропластичности наплавленного металла выполняли на образцах при деформации растяжения. Объектом исследования служили образцы из сталей марок 25, 40 и 40X, на которые проводили электроконтактную наплавку лентой толщиной 0,5 мм на режимах: $I_n = 6,0 \dots 6,5$ кА, $P = 1,25 \dots 1,5$ кН, $t_{имп} = 0,04 \dots 0,06$ с. Материал лент выбирали идентичным маркам стали образцов: 25 (ГОСТ 3560–73), 40 (ГОСТ 3560–73), 40X (ГОСТ 21996–76). Наплавленные образцы подвергали термической обработке по различным режимам с целью изменения структуры поверхностного слоя (табл. 1), в результате чего получено 5 групп наплавленных образцов для исследования микропластичности и ее однородности вглубь наплавленного металла и ЗТВ.

Для исследования влияния структуры на микропластичность поверхностных слоев вдоль

Таблица 1. Режимы термической обработки наплавленных образцов для исследования микропластичности (время выдержки 1 ч)

Марка стали подложки	Группа	Режим начальной термообработки		Режим отпуска*	
		$T, ^\circ\text{C}$	Охлаждающая среда	$T, ^\circ\text{C}$	Время выдержки, ч
25	A	880...900	воздух	620	2,5
40	B	860...880	в печи	620	1,5
40X	I	850...870	в печи	640...660	1,5
40X	II	850...870	масло	640...660	1,5
40X	III	850...870	масло	540...560	1,5

*Охлаждение вместе с печью.

продольной оси образца с помощью микротвердомера ПМТ-3 наносили ряд реперных точек пирамидой под нагрузкой 20 г [6]. Отпечатки наносили через каждые 0,04...0,05 мм, т.е. через расстояния, соизмеримые с размером зерна наплавленного металла исследуемых образцов. Расстояние между отпечатками служило базой для расчета относительных деформаций под действием приложенных нагрузок.

Анализ микроструктуры проводили с помощью металлографического микроскопа МИМ 8 с цифровой фотонасадкой, что позволило определить минимальные нагрузки и соответственно напряжения, которые вызывают видимую пластическую деформацию. После каждого очередного нагружения проводили замеры 150...160 базо-

вых расстояний (расстояния между отпечатками реперных точек). По данным замеров расстояний между отпечатками определяли изменение этого расстояния при увеличении напряжения в результате приложенной текущей нагрузки.

Экспериментальные результаты исследования микропластической деформации наплавленных образцов в различном структурном состоянии приведены на рис. 1.

Большая микропластическая деформация наплавленных образцов группы А по сравнению с наплавленными образцами, прошедшими термообработку по режимам II, III и нормализацию (рис. 1), свидетельствует о структурном состоянии, обуславливающим повышение вязкости разрушения. Низкие значения напряжений указывают на более высокую подвижность дислокаций. Несмотря на то, что при исследовании микропластической деформации уже при самых малых напряжениях возникали остаточные микродеформации, под микроскопом линии скольжения обнаруживались при достаточно высоких напряжениях (рис. 2).

Характерно, что это напряжение увеличивается с повышением объемного содержания перлита и вместе с понижением температуры отпуска при термообработке по режиму III. В наплавленных образцах группы А образующиеся линии скольжения параллельны. С появлением большого количества перлита изменяется и форма линий скольжения, они приобретают изогнутый характер. Это имеет место тем в большей степени, чем больше объемное содержание перлита.

σ , МПа

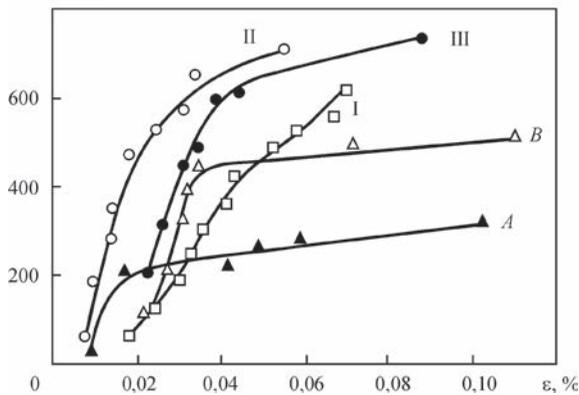


Рис. 1. Экспериментальные данные изменения величины микропластической деформации ϵ в наплавленных образцах после термической обработки (см. табл. 1) при увеличении напряжения растяжения σ

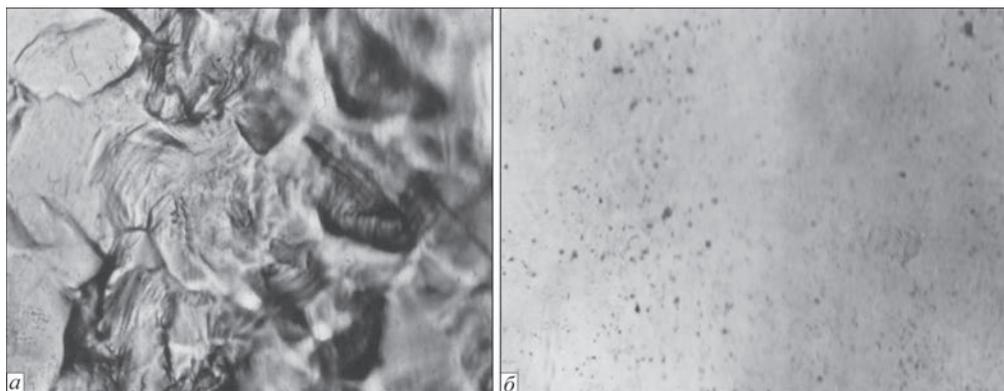


Рис. 2. Микроструктура ($\times 500$) поверхности наплавленных образцов из стали 40X после отжига (группа I) при максимальном напряжении 602 МПа (а) и после термообработки по режиму II (группа II) при минимальном напряжении 59,804 МПа (б)

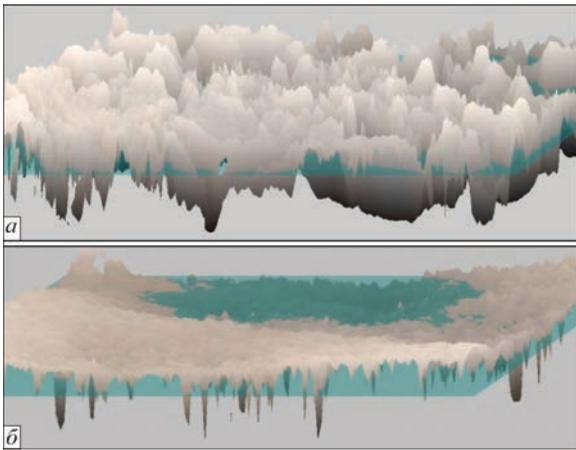


Рис. 3. 3D профили поверхности наплавленных образцов из стали 40X после отжига (группа I) при максимальном напряжении 602 МПа (а) и после термообработки по режиму II (группа II) при минимальном напряжении 59,804 МПа (б)

Линии скольжения в сорбитообразных структурах (наплавленные образцы группы II) изогнуты, появляются постепенно в широком диапазоне напряжений. При высоких напряжениях возрастает и количество объемов с высокой плотностью линий.

Пластическая деформация связана с движением дислокаций. Экспериментально установленные величины напряжений, вызывающие первые акты микропластической деформации, определяют среднюю необходимую величину напряжений для старта дислокаций, обуславливающих микропластическую деформацию. В наплавленных образцах, малочувствительных к концентрации напряжений, малой оказывается необходимая средняя величина напряжений для старта дислокаций. Следовательно, чем меньше величина напряжений, необходимая для начала движения дислокаций, тем менее чувствителен образец к концентрации напряжений. Наиболее высокую склонность к микропластической деформации имеют наплавленные образцы группы А, основная структурная составляющая которых феррит. Это обусловлено наиболее высокой склонностью к движению дислокаций под влиянием приложенных напряжений. В указанных образцах наиболее легко возникает деформация, требуются сравнительно малые напряжения и для старта, и для движения дислокаций в микрообъемах. С увеличением количества цементитной составляющей (перлита) возрастает сопротивление образцов микропластической деформации.

Для наплавленных образцов из стали 25 необходимы наименьшие напряжения для возникновения микропластической деформации — 30,5 МПа (см. рис. 1). В наплавленных образцах с большим содержанием в структуре цементита эти напряжения выше. Особенно они высоки для образцов, которые после наплавки подверглись термической обработке с получением сорбита и троостита отпуска. Например, для наплавленных образцов из

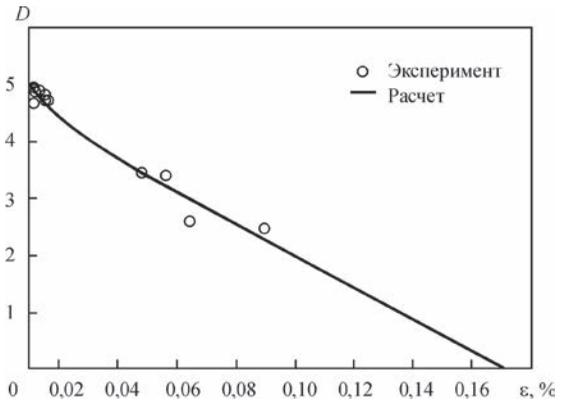


Рис. 4. Изменение коэффициента упрочнения D в зависимости от средней суммарной микропластической деформации ϵ наплавленных образцов из стали 25 в нормализованном состоянии (группа А)

стали 40X с сорбитом отпуска (II группа) минимальные напряжения для возникновения микропластической деформации составляют 59,804 МПа (см. рис. 2, б), а для тех же образцов с трооститом отпуска (III группа) — 201,16 МПа (см. рис. 1).

Морфологию поверхности наплавленного слоя, в зависимости от приложенной нагрузки, удобно наблюдать, используя метод послойной микроскопии, который позволяет получать топографические рельефы объемных объектов. 3D профиль поверхности (рис. 3) показывает, что уже при минимальных напряжениях заметна значительная неравномерность распределения микродеформаций по поверхности исследуемого наплавленного образца, подвергнутого термической обработке, что свидетельствует о повышенной склонности к концентрации напряжений.

Затруднение движению дислокаций в поверхностном слое наплавленного металла приводит к образованию единичных пиков различной величины, хаотично рассредоточенных вдоль поверхности, т. е. к образованию концентраторов напряжений по всей поверхности (рис. 3). При максимальных напряжениях морфология поверхности свидетельствует о росте габаритов неровностей поверхности со значительным увеличением отдельных пиков и частоты неровностей (см. рис. 3, а). Рост высот неровностей

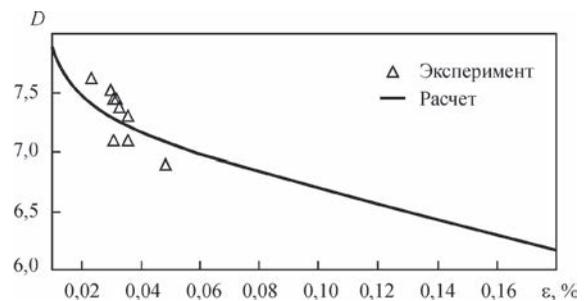


Рис. 5. Изменение коэффициента упрочнения D в зависимости от средней суммарной микропластической деформации ϵ наплавленных образцов из стали 40X после термообработки по режиму III (группа III)

Таблица 2. Уравнения, аппроксимирующие зависимость экспериментальных данных коэффициента упрочнения от степени относительной деформации

Металл наплавки на стали	Термообработка	Группа	Структура	Вид уравнения
25	Нормализация	А	Феррит + перлит	$D = 4,6226 - 27,1629\epsilon_i + \frac{0,0068}{\epsilon_i}$
40	Нормализация	В	Перлит + феррит	$D = 4,7773 - 42,8378\epsilon_i + \frac{0,0121}{\epsilon_i}$
40X	Отжиг	І	Перлит + феррит	$D = 6,643 - 45,5734\epsilon_i + \frac{0,0068}{\epsilon_i}$
40X	Термообработка по режиму II	II	Сорбит	$D = 6,7291 - 48,2929\epsilon_i + \frac{0,0023}{\epsilon_i}$
40X	Термообработка по режиму III	III	Троостит	$D = 5,2241 - 6,10107\epsilon_i + \frac{0,0074}{\epsilon_i}$

может быть следствием высокого сопротивления движению дислокаций.

Существует связь между поведением дислокаций (их движением, накоплением у препятствий) и модулем пластичности. В частности, чем больше модуль пластичности, тем быстрее накапливаются дислокации и тем выше чувствительность материала к концентрации напряжений [8, 9]. Модуль пластичности (коэффициент упрочнения) определяли с использованием методов моделирования в программной среде StatSoftStatisticaV6.0 (табл. 2, рис. 4, 5).

Таким образом, величины коэффициента упрочнения при микропластической деформации неодинаковы для разных структурных состояний и степени деформации, что согласуется с данными работ [10, 11]. Из исследованных образцов образцы группы А характеризуются наименьшим коэффициентом упрочнения (см. рис. 4), а наибольший коэффициент упрочнения имеют наплавленные образцы в состоянии после термообработки по режиму III (см. рис. 5). С увеличением степени деформации коэффициент упрочнения снижается во всех исследованных структурных состояниях, что указывает на зависимость процесса пластического течения от степени микродеформации.

Проведенные исследования склонности наплавленного металла в различных структурных состояниях к микропластической деформации позволили выявить структуру наплавленного металла, которая является наименее чувствительной к концентрации напряжений. Так, с увеличением в структуре цементитной составляющей повышается чувствительность металла к концентрации напряжений, а наличие в структуре наплавленного слоя свободного феррита снижает интенсивность накопления дислокаций в ходе микродеформаций и, как следствие, чувствительность наплавленного металла к концентрации напряжений снижается. Результаты

исследований данной работы использованы при выборе рациональной технологии восстановления деталей.

Выводы

1. Исследовано влияние структуры на микропластичность образцов, наплавленных электроконтактной наплавкой. Показано, что наплавленный металл, в котором в процессе микродеформации не столь интенсивно накапливаются условия, препятствующие движению дислокаций, менее склонен к концентрации напряжений.

2. Экспериментально подтверждено влияние коэффициента упрочнения на чувствительность к концентрации напряжений применительно к образцам, наплавленным лентами из конструкционных углеродистых сталей с последующей термической обработкой. Установлено, что наиболее высокое сопротивление микропластической деформации наблюдается в наплавленных образцах после их термической обработки с получением сорбита и троостита, что связано с более развитой неравномерностью распределения микродеформаций по поверхности образца и увеличением числа препятствий для движения дислокаций.

Список литературы

1. Бурак П. И. (2007) Движущие силы схватывания и образования процесса соединения поверхностей при электроконтактной приварке. *Международный технико-экономический журнал*, 4(4), 33–37.
2. Сайфуллин Р. Н. (2008) Восстановление деталей машин электроконтактной приваркой металлопорошковых композиций. *Техника в сельском хозяйстве*, 2, 26–28.
3. Сайфуллин Р. Н. (2009) Восстановление деталей электроконтактной приваркой порошковой проволоки. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, 1, 27–28.
4. Понтиленко Ф. И., Лялякин В. П., Иванов В. П., Константинов В. М. (2003) *Восстановление деталей машин. Справочник*. Москва, Машиностроение.

5. Черноиванов В. И., Лялякин В. П. (2003) *Организация и технология восстановления деталей*. Москва, ГОСНИТИ.
6. Головин С. А., Пушкар А. (1980) *Микропластичность и усталость металлов*. Москва, Металлургия.
7. Мадьянов С. А., Калинин В. Р., Краев А. П., Малиновская С. Г. (1990) Исследование микропластической деформации как метод оценки охрупчивания металлов. *Сб. Механика и физика разрушения хрупких материалов*, Киев, сс. 33–38.
8. Исаев Н. В., Шумилин С. Э., Забродин П. А. и др. (2013) Деформационное упрочнение и скачкообразная деформация ультрамелкозернистых поликристаллов твердого раствора Al–Li при температуре 0,5 К. *Физика низких температур*, 39, 7, 818–826.
9. Маркашова Л. И., Алексеенко Т. А., Жданов С. Л., Ганева Т. В. (2013) Влияние внешнего статического нагружения на изменение параметров структуры металла участка перегрева ЗТВ сварных соединений высокопрочных сталей. *Вісник Чернівецького державного технологічного університету*, 1 (63), 87–92.
10. Терентьев В. Ф. (2006) Усталость высокопрочных сталей. Ч. 1. Корреляция с пределом прочности, вид кривых и зарождение трещин. *Деформация и разрушения материалов*, 8, 2–11.
11. Chapetti M. D., Tagawa T., Miyata T. (2003) Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon steels. Part 1: Revive and analysis of the mechanism of failure. *Materials Science and Engineering*. A., 356, 1-2, 227–235.

References

1. Burak, P.I. (2007) Driving forces of cohesion and formation of surface bonding process in electric resistance welding-on. *Intern. Techn. and Economic J.*, 4(4), 33-37.
2. Sajfullin, R.N. (2008) Restoration of machine parts by electric resistance welding-on of metal-powder compositions. *Tekhnika v Selskom Khozyajstve*, 2, 26-28.
3. Sajfullin, R.N. (2009) Restoration of parts by electric resistance welding-on with flux-cored wire. *Mekhanizatsiya i Elektrifikatsiya Selskogo Khozyajstva*, 1, 27-28.
4. Pontileenko, F.I., Lyalyakin, V.P., Ivanov, V.P. et al. (2003) *Restoration of machine parts: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie.
5. Chernoiivanov, V.I., Lyalyakin, V.P. (2003) *Organizing and technology of restoration of parts*. Moscow, GOSNITI.
6. Golovin, S.A., Pushkar, A. (1980) *Microplasticity and fatigue of metals*. Moscow, Metallurgiya.
7. Madyanov, S.A., Kalinin, V.R., Kraev, A.P. (1990) Examination of microplastic deformation as a method of evaluation of metal embrittlement. In: *Mechanics and physics of fracture of brittle materials*: Transact. Kiev, p.p. 33-38.
8. Isaev, N.V. Shumilin, S.E., Zabrodin, P.A. et al. (2013) Strain hardening and stepwise deformation of ultrafine-grained polycrystals of solid solution Al-Li at temperature of 0.5 K. *Fizika Nizkikh Temperatur*, 39(7), 818-826.
9. Markashova, L.I., Alekseenko, T.A., Zhdanov, S.L. et al. (2013) Influence of external static loading on change of metal structure parameters of over-heat area in HAZ of high-strength steel welded joints. *Visnyk Chernigiv. Derzh. Tekhnol. Un-tu*, 1(63), 87-92.
10. Terentiev, V.F. (2006) Fatigue of high-strength steels. Part 1: Correlation with ultimate strength, types of curves and crack initiation. *Deformatsiya i Razrusheniya Materialov*, 8, 2-11.
11. Chapetti, M.D., Tagawa, T., Miyata T. (2003) Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon steels. Part 1: Revive and analysis of the mechanism of failure. *Mater. Sci. & Engin. A.*, 356(1-2), 227-235.

О. В. Бережна¹, В. Д. Кузнецов¹,
В. Д. Кассов², П. А. Гавриш¹

¹НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».
03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

E-mail: kuznet-sov@kpi.ua

²Донбаська державна машинобудівна академія.
84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна, 72

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ МЕТАЛУ, НАПЛАВЛЕНОГО ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИМ МЕТОДОМ

Пошук оптимізації структури та властивостей наплавленого металу деталей є актуальною задачею, рішення якої дозволяє підвищити їх експлуатаційні властивості та подовжити робочий ресурс. Дані досліджень у цьому напрямку при використанні електроконтактного наплавлення вельми обмежені. В роботі встановлено, що здатність наплавленого поверхневого шару деталі (наплавлений метал та зона термічного впливу) до мікропластичної деформації є важливим фактором схильності до концентрації напружень. Отримано структуру наплавленого металу, яка відрізняється низькою чутливістю до концентрації напружень. Показано, що підвищення в структурі наплавленого шару вмісту цементиту призводить до зростання схильності до накопичення дислокацій в ході мікрореформацій, у той час, як наявність великого обсягу вільного фериту дозволяє знизити інтенсивність накопичення дислокацій в ході мікропластичної деформації, зменшуючи чутливість наплавленого металу до концентрації напружень. Бібліогр. 11, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: електроконтактне наплавлення, структура поверхневого шару, мікрореформація, концентрація напружень

E. V. Berezhnaya¹, V. D. Kuznetsov¹,
V. D. Kassov², P. A. Gavrish²

¹NTTU Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
37 Pobedy Ave., 03056, Kiev, Ukraine.
E-mail: Elena.kassova07@gmail.com

²Donbass State Machine-Building Academy.
72 Akademicheskaya str., 84313, Donetsk region,
Kramatorsk, Ukraine

INVESTIGATION OF MICROPLASTIC DEFORMATION OF METAL DEPOSITED BY ELECTRIC CONTACT METHOD

The search for optimization of the structure and properties of the deposited metal of parts is an urgent task, the solution of which allows increasing their service properties and extending the service life. The data of investigations in this direction in using the electric contact surfacing are very limited. It was found in the work that the tendency of the deposited surface layer of a part (deposited metal and HAZ) to microplastic deformation is an important factor in determination of metal sensitivity to stress concentration. A structure of the deposited metal was obtained, which has a low sensitivity to stress concentration. It was shown that increase in the content of cementite in the structure of deposited layer leads to increased tendency of accumulating dislocations during microdeformations, and the presence of a large volume of free ferrite allows decreasing the intensity of accumulating dislocations, reducing sensitivity of the deposited metal to stress concentration. 11 Ref., 2 Tables, 5 Figures.

Key words: electric contact surfacing, structure of the surface layer, microdeformation, stress concentration

Поступила в редакцію 13.09.2017