

УДК: 621.791; 533.9

**Киро С. А., Опря М. В., Эннан А. А.-А.**

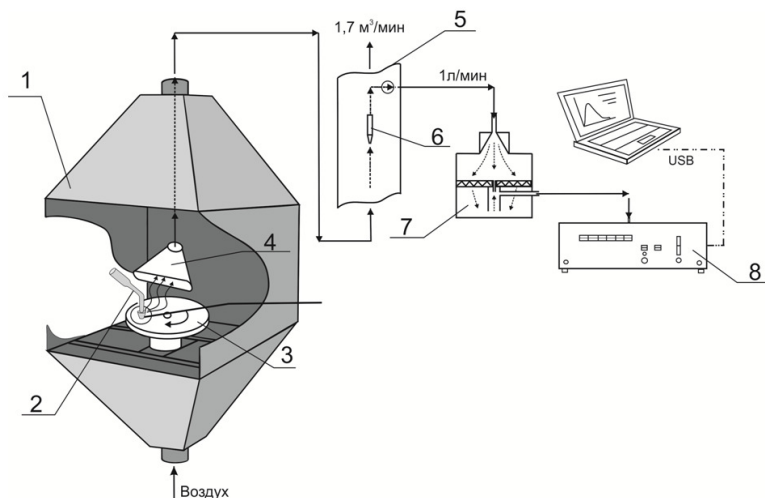
*Фізико-хімічний інститут захисту оточуючої середовища та людини, г. Одеса  
E-mail: serkiro1955@gmail.com*

### **Влияние параметров режима электродуговой сварки в защитном газе на дисперсный и химический состав частиц сварочного аэрозоля.**

*Рассмотрено влияние параметров режима сварки на дисперсный состав ингаляционных частиц, образующихся при электродуговой сварке в защитном газе (СО<sub>2</sub>). Показаны зависимости бимодального распределения частиц по размеру от отношения энергии сварочной дуги к объему расходуемой электродной проволоки в диапазоне от 40 до 70 кДж/см<sup>3</sup>. Представлены результаты измерений элементного состава и удельной поверхности мод ингаляционных частиц сварочного аэрозоля.*

**Введение.** При электродуговой сварке металлов образуются токсичные аэродисперсные частицы – твердая составляющая сварочного аэрозоля (ТССА), проникающую способность которой в органы дыхания связывают с дисперсным составом, а биологическую активность – с химическим составом и удельной поверхностью ингаляционных частиц [1]. Действующая методология оценки вредного воздействия ТССА на здоровье сварщиков и состояние окружающей среды, основана только на сравнении содержания токсичных компонентов ТССА в воздухе рабочей зоны (по валовым показателям) с соответствующими ПДК [2]. Разнообразие размеров, форм и химических составов ингаляционных частиц [3-5] при этом не учитывается, хотя в лёгких человека частицы разных размеров и формы осаждаются с различной эффективностью [6]. Поэтому, исследования, позволяющие проследить взаимосвязь дисперсного состава ингаляционных частиц и технологических параметров режима сварки, имеют большое прикладное значение. Однако, такие данные в научной литературе практически не представлены или вообще отсутствуют, если речь идет о взаимосвязи химического и дисперсного состава, удельной поверхности частиц ТССА. Предыдущие исследования образования ТССА при электродуговой сварке металлов в защитном газе показали, что дисперсный состав зависит от свойств защитного газа, в частности, установлено, что расход защитного газа не влияет на дисперсный состав ТССА, а увеличение температуры защитного газа (в диапазоне от 300 до 600К) приводит к укрупнению и уменьшению счетной концентрации ингаляционных частиц в зоне дыхания сварщика [7, 8].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния технологических параметров режима сварки на дисперсный состав ингаляционных частиц, образующихся при электродуговой сварке углеродистых и низколегированных сталей в защитном газе (СО<sub>2</sub>), а также представлены результаты измерений химического состава и удельной поверхности фракций ТССА.

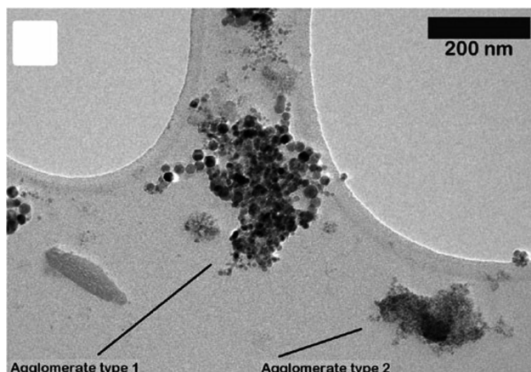


**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – сварочная камера; 2 – сварочная горелка; 3 – вращающийся диск для наплавки металла; 4 – щелевой воздухозаборник; 5 – вертикально расположенная труба; 6 – наконечник прободоотборной трубки для изокинетического отбора проб; 7 – аэрозольный разбавитель; 8 – лазерный аэрозольный спектрометр

**Экспериментальная установка.** На рис.1 показана принципиальная схема экспериментальной установки, которая использовалась при измерении дисперсного состава ингаляционных частиц.

ТССА получали в сварочной камере в процессе наплавки металла на вращающийся (1об/мин) диск (диаметр 180мм, толщина 12мм) из стали Ст3 полуавтоматом инверторного типа «Патон ПСИ-250Р DC MMA/MIG/MAG». Диапазон технологических параметров режима наплавки электродной проволокой Св08Г2С диаметром 0,8мм рекомендован ее производителем: постоянный ток обратной полярности (электродная проволока является положительным, а наплавляемый диск - отрицательным полюсами) от 50 до 125А и напряжение от 18 до 22 В. Среднее значения сварочного тока в опытах измерялись с помощью шунта, подключенного к вольтметру. Скорость подачи электродной проволоки в процессе наплавки определялась измерением длины проволоки, выходящей из контактного наконечника за заданное время и варьировалась от 4 см/с до 11 см/с. Во всех опытах поддерживали постоянными расстояние между контактным наконечником и наплавляемым диском (9 мм) и угол (90°), измеренный между диском и осью проволоки, а также расход CO<sub>2</sub> в процессе наплавки – 12 л/мин.

ТССА улавливали с помощью щелевого воздухозаборника, установленно-го в сварочной камере на расстоянии 20 см над дугой, с расходом удаляемого воздуха 1,7 м<sup>3</sup>/мин и направляли в вертикальную трубу для изокинетического



**Рис. 2.** ТЕМ изображения структур ингаляционных частиц [11]: первая мода - гомоагрегаты первичных частиц со средним диаметром 3÷5 нм (type 2); вторая мода - гетероагрегаты, содержащих первичные частицы со средним диаметром 3÷5 нм и 10÷15 нм (type 1)

отбора проб с расходом 1 л/мин [9]. Дисперсный состав ТССА измеряли с помощью лазерного аэрозольного спектрометра ЛАС-П с каналами (мкм): 0.15-0.2; 0.2-0.25; 0.25-0.3; 0.3-0.4; 0.4-0.5; 0.5-0.7; 0.7-1.0; 1.0-1.5; >1.5 [10]. Максимальная относительная погрешность при определении размера и счетной концентрации частиц не превышала 5% и 10%, соответственно, при их концентрации в пробе до  $2 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Типичные значения счетной концентрации частиц в пробах  $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . Поэтому, использовался аэрозольный разбавитель с коэффициентом разбавления 150 для расхода потока пробы 1 л/мин (рис.1). В разбавителе применялись аэрозольные фильтры, снаряженные тканью Петрянова (ФПП) с эффективностью улавливания не менее 99,97% для частиц диаметром 0,15-0,2мкм.

ТССА, образующийся при электродуговой сварке, имеет трех-модальное распределение ингаляционных частиц по размерам [9], где первые две моды представляют собой агломераты первичных частиц размером менее 1мкм (рис.2), а третья мода – частицы дезинтеграции электродной проволоки размером более 1÷2мкм. Поэтому, данные измерений счетной концентрации частиц ТССА в первых семи каналах ЛАС-П обрабатывались в двух-модальном приближении.

Наилучшим приближением для измерений счетной концентрации частиц ТССА в диапазоне от 0,15 до 1 мкм является линейная комбинация двух логарифмических распределений (без учета вклада частиц дезинтеграции):

$$f(d, x, d_{m1}, \sigma_1, d_{m2}, \sigma_2) = x \cdot f_1(d, d_{m1}, \sigma_1) + (1 - x) \cdot f_2(d, d_{m2}, \sigma_2), \quad (1)$$

$$f_i(d, d_{mi}, \sigma_i) = \frac{1}{d \sqrt{2\pi \ln \sigma_i}} \exp \left[ -\frac{(\ln d - \ln d_{mi})^2}{2 \ln^2 \sigma_i} \right],$$

где  $d_m = \bar{d} \exp(-\ln^2 \sigma / 2)$  – медиана распределения;  $\bar{d}$  – средний размер частиц;  $\sigma$  – стандартное отклонение (дисперсия).

Для каждого  $j$  канала LAS-P записывается уравнение:

$$N_j = N_T \cdot \Delta d_j \cdot f(d_{cj}, x, d_{m1}, \sigma_1, d_{m2}, \sigma_2), \quad (2)$$

где  $N_j$  – число частиц, измеренных в  $j$  канале;  $N_T$  – неизвестное полное число частиц в объеме пробы, которое включает частицы с диаметром  $d < 0.15$  мкм;  $\Delta d_j$  – ширина канала;  $d_{cj}$  – среднее значение размера канала  $j$ . Решение системы уравнений (2) для первых семи каналов ЛАС-П позволяет определить параметры распределения частиц ТССА по размерам (1), вычислить средний диаметр  $\bar{d} = d_m \exp(\ln^2 \sigma / 2)$  и счетную концентрацию частиц каждой моды  $n_1 = x n_T$ ,  $n_2 = (1 - x) n_T$ , где  $n_T$  – общая счетная концентрация уловленных частиц.

**Дисперсный состав ТССА. Экспериментальные результаты.** Основными внешними технологическими параметрами режима сварки в защитном газе при заданных значениях диаметра электродной проволоки, расхода и состава защитного газа являются: скорость подачи электродной проволоки (в установленном режиме скорость подачи электродной проволоки в равной скорости ее плавления) –  $v$  см/с, напряжение источника питания дуги (напряжение дуги) –  $U$  В и сила сварочного тока –  $I$  А. На рис.3 представлены зависимости средних диаметров двух мод ингаляционных частиц ТССА от скорости подачи электродной проволоки.

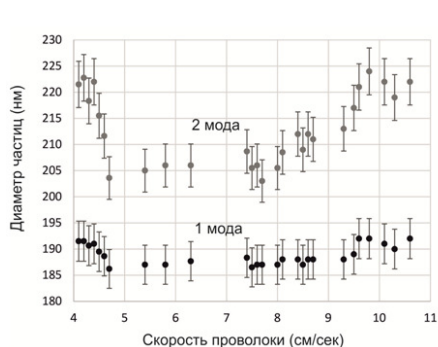
Как видим, зависимости среднего размера первых двух мод частиц ТССА от  $v$  имеют немонотонный характер (рис.3). Аналогичный вид имеют зависимости средних размеров и счетных концентраций частиц мод ТССА от силы сварочного тока и напряжения дуги.

Поиск комбинации параметров режима сварки в защитном газе показал, что наблюдаемые тенденции изменения дисперсного состава ингаляционных частиц ТССА, описывает отношение энергии сварочной дуги к объему расходуемой электродной проволоки –  $E_V$  кДж/см<sup>3</sup>, (далее удельная энергия):

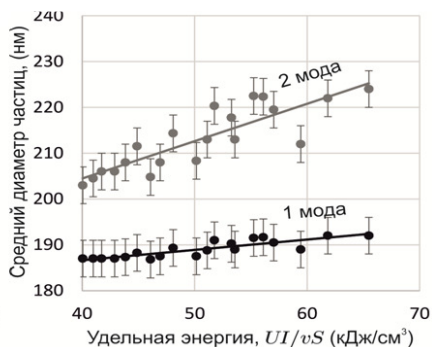
$$E_V = \frac{I \cdot U}{v \cdot S},$$

где,  $S$  – площадь сечения электродной проволоки (см<sup>2</sup>). На рис.4 и рис.5 представлены зависимости средних диаметров и счетных концентраций мод ингаляционных частиц ТССА от удельной энергии  $E_V$ .

Как следует из представленных результатов зависимости средних диаметров и счетных концентраций мод ингаляционных частиц ТССА от удельной энергии линейные. Увеличение  $E_V$  приводит к возрастанию доли энергии сварочной дуги расходуемой электродной проволокой, в результате интенсифицируется испарение и разбрызгивание расплавленного металла электродной проволоки (взрывное испарение) и возрастает интенсивность поступления паров материалов электродной проволоки в зону конденсации. Увеличение концентрации паров в зоне конденсации при прочих равных условиях способствует



**Рис. 3.** Зависимости средних диаметров мод ингаляционных частиц ТССА от скорости подачи проволоки  $v$

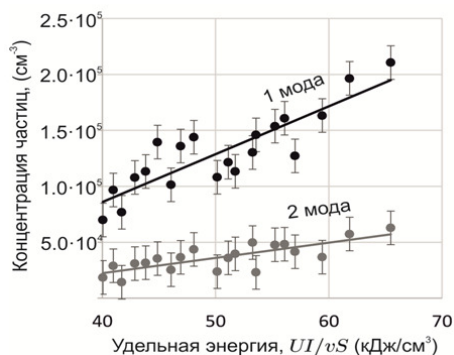


**Рис. 4.** Зависимости средних размеров мод ингаляционных частиц ТССА от удельной энергии

увеличению концентрации и размера первичных частиц, а также концентрации и размеров агломератов, образованных из этих частиц.

При этом, увеличение  $E_V$  примерно в 1,5 раза слабо влияет (рост в пределах 5%) на средний диаметр частиц первой моды (гомоагрегаты первичных частиц со средним диаметром  $3 \div 5$  нм) ингаляционных частиц ТССА (рис.4), в то же время их концентрация возрастает в  $1,5 \div 2$  раза (рис.5). Аналогично изменяется средний размер частиц второй моды (гетероагрегаты, содержащие первичные частицы со средним диаметром  $3 \div 5$  нм и  $10 \div 15$  нм) - в пределах  $5 \div 12\%$ , а их концентрация возрастает в  $1,2 \div 2,5$  раза.

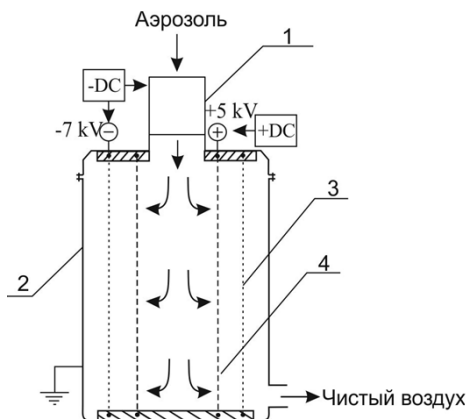
**Химический состав ТССА. Экспериментальные результаты.** Моделирование процесса образования ТССА при сварке электродной проволокой Св08Г2С в  $\text{CO}_2$  показало зависимость химического состава первичных частиц от их размера [12] - с увеличением диаметра частиц возрастает содержание железа, а марганца и кремния уменьшается (суммарное содержание Fe, Mn и Si в проволоке более 99,5%). Учитывая различие в типах структур ингаляционных частиц (рис.2) следует ожидать, что различия в химическом составе первичных частиц сохранятся и для мод ингаляционных частиц ТССА, несмотря на усреднение по множеству первичных частиц, которые образуют каждый агломерат. Для подтверждения этого предположения были проведены измерения химического состава и удельной поверхности фракций ТССА. Отбор проб фракций проводили методом электростатического осаждения предварительно заряженных ингаляционных частиц ТССА на проточные перфорированные и сетчатые электроды в наведённом электрическом поле [13]. ТССА получали в сварочной камере (рис.1) при  $E_V = 50 \text{ кДж/см}^3$  и улавливали с помощью щелевого воздухозаборника, установленного в сварочной камере на расстоянии 20 см над дугой, с расходом удаляемого воздуха  $1.7 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Схема электрофильтра для фракционирования ТССА показана на рис.6.



**Рис. 5.** Зависимости счетной концентрации мод ингаляционных частиц ТССА от удельной энергии

Электрофильтр содержит: устройство униполярной зарядки [14], где частицы ТССА заряжаются в поле отрицательного коронного разряда (ток коронного разряда  $I_k = 600 \mu A$ , потенциал многоигольчатого коронирующего электрода  $U_1 = -7 кВ$ ), и электростатический осадитель с двумя металлическими коаксиальными фильтрами, установленными на опорах из изоляционного материала. Первым по потоку запыленного воздуха расположен фильтр грубой очистки диаметром 14 см, изготовленный из перфорированной оцинкованной стали с круглыми отверстиями диаметром 1,2 мм и живым сечением 27%. Потенциал фильтра грубой очистки положительный ( $U_2 = +5 кВ$ ). Фильтр тонкой очистки диаметром 20 см изготовлен из сетки нержавеющей стали с квадратными ячейками 0,063 мм, диаметром проволоки 0,04 мм и живым сечением 37%. Потенциал фильтра тонкой очистки отрицательный ( $U_1 = -7 кВ$ ). По данным измерения массовой концентрации ТССА до и после электрофильтра его эффективность превышает 99%. Фракционирование ТССА в электростатическом осадителе осуществляется по электрической подвижности ингаляционных частиц, которая зависит от их размера [14]. Осадок ТССА на внутренней (лицевой по потоку) поверхности фильтра грубой очистки преимущественно содержит частицы второй моды ТССА (фракция 1). Частицы первой моды ТССА осаждаются на внешнюю поверхность фильтра грубой очистки в результате действия электростатических сил в направлении противоположном потоку запыленного воздуха, и формирования завихрений потока (рециркуляционных зон) при его течении через отверстия фильтра с малым живым сечением (фракция 2), а также внутреннюю поверхность фильтра тонкой очистки (фракция 3). Для образцов фракций ТССА проводились измерения удельной поверхности методом БЭТ (Quantachrome Autosorb-6B) и элементного состава (Атомно-абсорбционный спектрофотометр Сатурн-3П1). Результаты измерений представлены в табл. 1.

Как следует из представленных в табл. 1 данных, частицы первой моды ТССА (72% масс.) являются наиболее токсичной группой ингаляционных



**Рис. 6.** Схема электрофильтра для фракционирования ТССА: 1 – устройство униполярной зарядки; 2 – электростатический осадитель; 3 – сетчатый фильтр тонкой очистки; 4 – перфорированный фильтр грубой очистки

**Таблица 1.** Удельная поверхность и элементный состав фракций ТССА

Параметр	Фракция 1	Фракция 2	Фракция 3
Массовая доля в ТССА (%)	28	39	33
Удельная поверхность (м <sup>2</sup> /г)	16,8	30,8	28,5
Содержание Fe (%)	60,4	53,1	54,9
Содержание Mn (%)	7,3	8,8	8,7
Содержание Si (%)	2,8	6,2	5,1
Содержание O и примесей (%)	29,5	31,9	31,3

частиц из-за их большой удельной поверхности и повышенного содержания марганца. Поэтому, для санитарно-гигиенического оценивания условий труда сварщиков важно извлечь эту группу частиц и анализировать ее отдельно. Корреляция между элементным составом мод ингаляционных частиц ТССА и их удельной поверхностью отражает зависимость химического состава первичных частиц от их размера [12] и различия в типах структур агломератов.

**Заключение.** Исследовано влияние технологических параметров режима сварки на дисперсный состав ингаляционных частиц, образующихся при электродуговой сварке углеродистых и низколегированных сталей в защитном газе. Показано, что средний диаметр ингаляционных частиц ТССА и их счетная концентрация линейно зависят от отношения энергии сварочной дуги к объему расходуемой электродной проволоки ( $E_V = I \cdot U / v \cdot S$ ). Увеличение  $E_V$  приводит к незначительному ( $\leq 12\%$ ) росту размеров ингаляционных частиц и существенному (1,2÷2,5 раза) увеличению их концентрации в зоне дыхания

сварщика. Установлена корреляция между элементным составом мод ингаляционных частиц ТССА и их удельной поверхностью.

### Литература:

1. Antonini J.M. Health effect of welding // Critical Reviews of Toxicology. – 2003. – V. 33(1). – P. 61-103.
2. Donaldson K., Brown D., Clouter A. The pulmonary toxicology of ultrafine particles // J Aerosol Med. – 2002. – V. 15. – P. 213–220.
3. Oprya M., Kiro S., Worobiec A., Horemans B., Darchuk L., Novakovic V., Ennan A., Van Grieken R. Size distribution and chemical properties of welding fumes of inhalable particles // Journal of Aerosol Science. – 2012. – V. 45. – P. 50-57.
4. Pokhodnya I.K., Yavdoshchin I.R., Gubinya, I.P. Welding fume—Factors of influence, physical properties // The Paton Welding Journal. - 2011. – V. 6. – P. 33–35.
5. Worobiec A., Stefaniak E.A., Kiro S., Oprya M., Bekshaev A., Spolnik Z., Potgieter-Vermaak S.S., Ennan A., Van Grieken R. Comprehensive microanalytical study of welding aerosols with X-ray and Raman based methods // X-Ray Spectrometry. - 2007. – V. 36. – P. 328–335.
6. Oberdorster G. Significance of particle parameters in the evaluation of exposure-dose-response relationships of inhaled particles // Inhalation Toxicology. – 1996. – V. 8. – P. 73–89.
7. Ojima J. Performance of a fume-exhaust gun system in CO<sub>2</sub> arc welding // Journal of Occupation Health. – 2006. – V. 48. – P. 207-209.
8. Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Ennan A.A Effects of shielding gas temperature and flow rate on the welding fume particle size distribution // Journal of Aerosol Science. – 2017. – V. 114. – P. 55-61.
9. Ennan A.A., Kiro S.A., Oprya M.V. and Vishnyakov V.I. Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding // Journal of Aerosol Science. – 2013. – V. 64. – P. 103-110.
10. Лазерный аэрозольный спектрометр (ЛАС-II). Научно-исследовательский физико-химический институт имени Л. Я. Карпова. – 2010. – модель 9814.290.000.
11. Miettinen M., Torvela T., Leskinen J.T.T. Physicochemical characterization of aerosol generated in gas tungsten arc welding of stainless steel // Annals of Occupational Hygiene. – 2016. – V. 60. – P. 960-968
12. Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Chursina O.D., Ennan A.A. Numerical and experimental study of the fume chemical composition in gas metal arc welding // Aerosol Science and Engineering. – 2018. – P. 1-9. doi.org/10.1007/s41810-018-0028-2
13. Эннан А.А., Опря М.В., Киро С.А., Вишняков В.И. О новых возможностях электростатического улавливания твердой составляющей сварочного аэрозоля // Физика аэродисперсных систем. – 2017. – №54. – С. 122-128.
14. Vishnyakov V.I., Kiro S.A., Oprya M.V., Ennan A.A. Charge distribution of welding fume particles after charging by the corona ionizer // Journal of Aerosol Science. – 2016. – V. 94. – P. 9-21.



***Kiro S. A., Oprya M. V., Ennan A. A.-A.***

**Вплив параметрів режиму електродугового зварювання у захисному газі на дисперсний і хімічний склад частинок зварювального аерозолію**

**АНОТАЦІЯ**

*Розглянуто вплив параметрів режиму зварювання на дисперсний склад інгаляційних частинок, що утворюються при зварюванні вуглецевих і низьколегованих сталей у захисному газі (CO<sub>2</sub>). Показані залежності бімодального розподілу частинок за розмірами від відношення енергії зварювальної дуги до об'єму витраченої електродної проволочки у діапазоні від 40 до 70 кДж/см<sup>3</sup>. Представлені результати вимірювань елементного складу і питомої поверхні мод інгаляційних частинок зварювального аерозолію.*

***Kiro S.A., Oprya M.V., Ennan A. A.-A.***

***Influence of the gas metal arc welding regime parameters on the disperse and chemical composition of the welding fume particles***

**SUMMARY**

*The influence of the gas (CO<sub>2</sub>) metal arc welding regime parameters on the disperse composition of the welding fume inhalable particles is studied. Dependences of the bimodal particle size distribution on the ratio of the welding arc energy to the volume of the consumed electrode wire in the range from 40 to 70 kJ/cm<sup>3</sup> are demonstrated. The results of measurements of elemental composition and specific surface of the welding fume modes are presented.*